



Innovative Kraftmess- und Wägetechnik durch Anwendung mechatronischer Konzepte

Technische Universität Ilmenau

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Prozessmess- und Sensortechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. T. Fröhlich

PF 10 05 65

98684 Ilmenau

Autoren: F. Hilbrunner, Chr. Diethold, G. Krapf, M. Kühnel, H. Weis

Ilmenau, Dezember 2011

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

INNOPROFILE
UNTERNEHMEN
Die BMBF-Innovationsinitiative
Neue Länder **REGION**

Zuwendungsempfänger:	Technische Universität Ilmenau Institut für Prozessmess- und Sensortechnik
Förderkennzeichen:	03IP512
Vorhabensbezeichnung:	Innovative Kraftmess- und Wägetechnik durch Anwendung mechatronischer Konzepte
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2006 bis 30.06.2011
Berichtszeitraum:	01.07.2006 bis 30.06.2011
Kontakt:	Technische Universität Ilmenau Fakultät Maschinenbau Institut für Prozessmess- und Sensortechnik Gustav-Kirchhoff-Straße 1 98693 Ilmenau
Ansprechpartner:	Dr.-Ing. Falko Hilbrunner E-Mail: Falko.Hilbrunner@TU-Ilmenau.de Telefon: 03677-69 1452
Internet:	http://www.tu-ilmenau.de/ikwi/

I. Projektdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt „Innovative Kraftmess- und Wägetechnik durch Anwendung mechatronischer Konzepte“ befasste sich mit den Teilbereichen:

- Dynamische Wägetechnik
- Präzisionswägetechnik
- Komparatorwaagen

Gemeinsames Projektziel war es, auf den genannten drei Teilgebieten Verbesserungen durch eine konsequente Umsetzung von neuen Methoden und Analyseverfahren zu erzielen. Eine zentrale Rolle spielte hierbei die Frage der Modellierung von Wägesystemen in Verbindung mit einer adaptierten digitalen Regelung und Steuerung. Bisherige Wägesysteme auf der Basis der elektromagnetischen Kraftkompensation (kurz: EMK-Waagen) beinhalten eine analoge Lageregelung des Waagenhebels. Dieses Konzept ist robust und bewährt, bietet jedoch kaum Flexibilität zur Integration neuer Strategien und Konzepte. Aus dieser Motivation heraus startete das InnoProfile Projekt.

Neben den fachlichen Aufgaben, basierend auf den Projektleitgedanken, bestanden auch strategisch-strukturelle Kriterien zur Stärkung der Innovationsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU) der Region.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt war am Institut Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der Fakultät Maschinenbau der TU Ilmenau angesiedelt.

Am IPMS werden folgende Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Kraftmess- und Wägetechnik
- Präzisionslängenmesstechnik
- Temperaturmesstechnik
- Kalibriertechnik.

Diesen konkreten Teilbereichen sind die allgemeinen Strategien:

- Mikrorechnergestützte Messsysteme und Sensoren
- Statisches und dynamisches Verhalten von Messsystemen und Sensoren
- Kalibrierung

übergeordnet.

Das IPMS verfügt über langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik. Unter der Leitung von Prof. G. Jäger begann bereits im Jahre 1968 im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Rapido die Forschung auf dem Gebiet der Spannungsoptik und 1977 die Entwicklung einer mikrorechnergesteuerten Wägezelle mit interferenzoptischen Kraftwandlern. Aus dieser Kooperation resultierte die Industriewaage IW5000, die von der Firma Rapido 10 Jahre lang produziert wurde. In diesem Zeitraum wurden ebenfalls Kraft-Momenten-Sensoren für Roboter entwickelt. Ab 1985 wurde eine Hochgeschwindigkeitswägeanlage entwickelt und in Geflügelschlachthöfen installiert. Von 1987 bis 1991 gab es eine wissenschaftliche Zusammenarbeit mit der Firma Brau und Lübbe Heidelberg. Seit 1990 besteht eine enge Kooperation mit der Sartorius AG, die neben der Firma Mettler Toledo eine führende Position auf dem Weltmarkt in der Präzisionswägetechnik einnimmt. Durch diese Zusammenarbeit gestützt wurde und wird die Kompetenz im Fachbereich auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik weiter ausgebaut. Im Bereich der Kraftmess- und Wägetechnik werden die Gebiete Industriewaagen, Laborwaagen, Kontrollwaagen, Präzisionswaagen, Komparatorwaagen und Suszeptometer bearbeitet. Daraus resultieren beispielsweise langjährige Erfahrungen in

- der Dynamik von Wägeprozessen (Dr.-Ing. S. Dontsova),
- der dynamischen Klimakompensation (Prof. Dr.-Ing. T. Fröhlich, Dr.-Ing. F. Hilbrunner),
- der Entwicklung und Konstruktion von Wägesystemen sowie Lastwechslern hinsichtlich, Mechanik, Elektronik, Software und Simulationen (Dr.-Ing. M. Domhardt, Dr.-Ing. D. Heydenbluth, Dipl.-Ing. M. Geyer) und
- der alternativen Wägeverfahren (Dr.-Ing. R. Füßl, Dr.-Ing. D. Heydenbluth).

Weiterhin verfügt das Institut Prozessmess- und Sensortechnik über eine sehr gute gerätetechnische und räumliche Ausstattung zur Untersuchung und Erprobung innovativer Kraftmess- und Wägeverfahren. Hierzu zählen beispielsweise

- ein speziell temperiertes und schwingungsisoliertes Wägelabor,
- mehrere Klimaprüfkammern großen Volumens,
- Teststrecken zur Simulation und Erprobung dynamischer Waagen und
- klimatisierte Messräume.

Diese Voraussetzungen stellten für eine Nachwuchsforschergruppe ideale Bedingungen dar. Aus jungen Mitarbeitern und Studenten des Institutes Prozessmess- und Sensortechnik wurde ein leistungsfähiges Kompetenzteam zusammengestellt. Zur Bearbeitung der bestehenden Aufgaben konnte diese Nachwuchsforschergruppe stets auf die Institutskompetenzen zurückgreifen. Aufgrund dieses vorhandenen Knowhows und der materiellen Voraussetzungen war ein hohes Potenzial zur Lösung der bevorstehenden Aufgaben gegeben. Die günstige Patentsituation auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik bot ebenso Freiraum für Innovationen.

Das hohe wissenschaftliche Niveau am IPMS auf den Forschungsgebieten „Präzisionslängenmesstechnik“ sowie „Temperaturmesstechnik“ lieferte zusätzlich innovatives Wissen und kreative Ideen zur Bearbeitung des beantragten Forschungsvorhabens, denn sowohl die hochgenaue Detektion von Verfor-

mungen, als auch die präzise Messung der Temperatur sind in der Kraftmess- und Wägetechnik unabdingbare Voraussetzung für eine Reduzierung der Messunsicherheit.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In Tabelle 1 ist der beantragte Arbeitsplan des Projektes dargestellt. Die Laufzeit des Projektes betrug fünf Jahre. Während dieser Zeit arbeiteten kontinuierlich fünf Nachwuchswissenschaftler an der Umsetzung der Arbeitspakete. Diese wurden durch studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt. Die Projektbearbeitung lehnte sich hierbei im Wesentlichen an die im Arbeitsplan definierten Pakete und Teilaufgaben an. Bei einzelnen Arbeitspaketen waren jedoch geringfügige Adaptionen an sich ändernde Rahmenbedingungen und an einen wachsenden Erkenntnisstand notwendig. Während der gesamten Laufzeit fand eine enge fokussierte Zusammenarbeit mit den Unternehmen PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH, SIOS Meßtechnik GmbH und der Sartorius AG statt. Diese Zusammenarbeit wurde durch regelmäßige Treffen zur Abstimmung des aktuellen Bearbeitungsstandes und des weiteren Vorgehens belebt und kontrolliert.

Ein wesentliches Projektziel und gleichzeitig eine wesentliche Motivation der bearbeitenden Nachwuchswissenschaftler lag in der Weiterqualifikation der in Form der Promotion. Zum derzeitigen Stand hat Frau S. Dontsova ihre Promotion erfolgreich verteidigt. Frau H. Weis, Herr M. Kühnel, Herr Chr. Diethold und Herr G. Krapf werden ihre Dissertation voraussichtlich Anfang 2012 einreichen.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	PM
1. Aufbau eines Demonstrators aus Mechanik, elektronischer Hardware und Software. Rapid Prototyping und Hardware in the Loop (HL) für Wägesysteme	3	3	3	3	3	3	48
• Anwendung für dynamische Waagen und für Komparatorwaagen							
• Erprobung neuer Regelalgorithmen an EMK-Waagen, Untersuchung und Anwendung von nichtlinearen oder adaptiven Strategien							
• Neue Qualität bei dynamischen Kraftmessungen und Wägungen: Rapid Control Prototyping von Regler- und Filteralgorithmen							
2. Untersuchungen zur Multi-Signalauswertung							
• Integration der Hebelposition ins Wägesystem bei EMK-Waagen			3	3	3	3	36
• Ausnutzen von Zusatzsignalen bei dynamischen Waagen							
• Kaskadierte Filter- und Regelkonzepte							
• Experimenteller Vergleich zwischen klassischer Auswertelektronik und adaptierter Multi-Signalauswertung							
3. Schwingungsanalyse an Waagen und Waagenbauteilen							
• Berührungsgelose Laserinterferometrische online Schwingungsanalyse an Waagenbauteilen	3	3	3	3	3		24
• Vergleich mit numerischen Simulationen							
4. Untersuchung dynamischer Waagen							
• Numerische Simulation verschiedener mechanischer Aufbauarten mittels Start-Simulation und mittels FEM und Vergleich der Ergebnisse						3	12
• Untersuchungen prinzipieller Möglichkeiten zur Unterdrückung von Schwingungseingriffen und zur mechanischen Reduktion der Schwingungseinfreiheitsgrade							
5. Verbesserung des Nulllagenduktors in EMK-Waagen	3	3	3	3	3		24
• Vergleich möglicher neuer Prinzipien							
• Numerische Simulation verschiedener Prinzipien							
• Aufbau eines Demonstrators							
• Ermittlung der messtechnischen Eigenschaften des Nulllagenduktors als Wegensor							
6. Dynamische Kompensation von Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen bei DMS- und EMK-Waagen							
• Langzeituntersuchungen zu Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen in geregelten und ungeregelten Messräumen und statistische Auswertung zu Abschätzung der Relationen der zu erwartenden Schwankungen							
• Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Temperatur und Feuchte bei der dynamischen Klimakompensation							
• Einfluss der Darstellungsvariante der Luftfeuchte in einer mathematischen Kompensation							
7. Erdbeschleunigungsunabhängige Massebestimmung sowie online Bestimmung der Erdbeschleunigung							
• Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur simultanen Messung von träger und schwerer Masse					3	3	12
8. Theoretische Untersuchung und Optimierung der Belastungszyklen bei der Eichung von Plattformwaagen, d.h. Eichung mittels Ersatzlastverfahren							
9. Erforschung und Qualifizierung neuer Lastwechslerprinzipien für automatische Lastwechselvorrichtung	3	3	3	3	3		24
• Optimierung der Steuerungsalgorithmen: Verkürzung der Fahrzyklen und Verringerung störender Luftverwirbelung							
• Robotersysteme konzipieren für vollautomatische Darstellung der Masseskala von 10 kg bis 1 mg							
10. Experimentelle Untersuchung von Massesückenfertiereinheiten							
• Neuartige mechanische Prinzipien für aktive, getriggerte Massesückenfertiereinheiten			3	3	3	3	30
• Bestimmen der funktionellen Eigenschaften verschiedener bleibender Varianten							
• Gegenüberstellung möglicher aktiver, mechanischer Funktions- und Konstruktionsprinzipien							
• Auswahl, Konstruktion, Teilfertigung, Aufbau Demonstrator							
• Untersuchung und Validierung der funktionellen Eigenschaften des Demonstrators							
• Berührungsgelose interferometrische Messung statischer und dynamischer Vorgänge beim Be- und Entlasten							
11. Untersuchung und Kompensation von Windlasten bei Fahrzeugwaagen und Silowaagen							
12. Erforschung und Erprobung alternativer Wägeverfahren							
Personenmonate	9	15	15	15	15	15	MS1
Meilensteine:							
MS1: HL-Demonstratoraufbau und -erprobung							
MS2: Demonstratoraktive mechanische Massesückenfertiereinheit aufgebaut und untersucht							

Tabelle 1: Bewilligter Arbeitsplan

4. Ausgangsbasis des wissenschaftlichen und technischen Standes

In der heutigen Industrie und Forschung hat die Kraftmess- und Wägetechnik eine immense Bedeutung. Vor allem in den Bereichen Prozesskontrolle und Qualitätssicherung besteht großer Bedarf an innovativer Kraftmess- und Wägetechnik. Eine drastische Reduzierung von Taktzeiten in der Produktion ist unter anderem nur durch hochadaptive und äußerst flexible Hochgeschwindigkeits-Kraftmess- und Wägetechnik zu erreichen. Dabei muss die Integration dieser Messtechnik in die für unsere Volkswirtschaft typischen hochproduktiven automatisierten Fertigungsprozesse mit in die Forschungsarbeiten einbezogen werden. Der Trend, dass die Kraftmess- und Wägetechnik immer mehr zur Ermittlung abgeleiteter physikalischer Größen eingesetzt wird hält an und erschließt völlig neue Möglichkeiten. Ein Beispiel hierfür ist der globale Übergang von der Volumen- zur Massedosierung. Durch Massedosierung kann in Prozessen die Genauigkeit erhöht werden, es können universelle Wägesysteme eingesetzt und somit Kosten reduziert werden. Auch zur Lösung strömungstechnischer Aufgaben bei der Herstellung beispielsweise von Hochleistungslegierungen, Spezialgläsern und Halbleiter-Einkristallen sind neue Qualitäten durch den Einsatz der Kraftmess- und Wägetechnik erzielbar.

Auf der anderen Seite erhöhen sich in diesem Zuge die Anforderungen an die Kraftmess- und Wägetechnik. Benötigt werden Geräte mit kurzer Messzeit, hoher Robustheit und Unempfindlichkeit gegenüber Störgrößen und hoher Genauigkeit. Auch die Fahrzeugindustrie benötigt innovative Wägetechnik. Beispielsweise soll im PKW-Bereich die Personenidentifikation durch die Integration von Wägesystemen in den Sitzen realisiert werden. Dadurch wird u. a. eine angepasste Airbag-Funktion für Kinder und Erwachsene möglich. Aber auch optimale Fahr- und Komforteinstellungen können personenbezogen gespeichert werden. Im LKW-Bereich könnten über eine fahrzeugeigene Frachtverwägung wichtige Probleme, wie Überladung und Frachtverlust, kontrolliert und protokolliert werden

Hochgeschwindigkeits-Kraftmess- und Wägeverfahren:

Die Zusammenarbeit zwischen dem Institut Prozessmess- und Sensortechnik und führenden Unternehmen der Branche führte in den letzten 20 Jahren zu vielfältigen, originären Anregungen auf dem Spezialgebiet „Dynamische Wägetechnik“ und zu erfolgreichen gemeinsamen Projekten. Innerhalb der Habilitationsschrift von L. Krause „Dynamische Wägetechnik“ wurde der Zusammenhang zwischen Schwingungsverhalten, Messsignalverarbeitung und Masseabweichungen im Detail theoretisch und experimentell dargestellt. Als Beispiel sei der Vorgang einer schnellen Gewichtsbestimmung innerhalb eines Produktionsprozesses genannt. Dafür werden sogenannte Kontrollwaagen mit dem Ziel eingesetzt, alle produzierten Stücke, Packungen oder Gebinde zu wiegen und unmittelbar danach entsprechend vorgegebenen Toleranzen zu sortieren. Beispielsweise wird gravimetrisch getestet, ob der Beipackzettel in einer Tablettenverpackung vorhanden ist, oder ob alle Löcher an einem Getriebegehäuse gebohrt wurden. Bei den theoretischen und experimentellen Untersuchungen am Institut PMS stellte sich heraus, dass die Dynamik der mechanischen Struktur zwischen Einwirkungsort der Gewichtskraft und Ort der elektrischen Signalgewinnung für die Begrenzung der Messgeschwindigkeit verantwortlich ist. Das gilt sowohl für das Ausschlag- als auch für das Kompensationsprinzip. Es wurde beispielsweise nachgewiesen, dass Drehschwingungen neben zusätzlichen Eigenfrequenzen und damit dynamischen Abweichungen, auch statische Abweichungen erzeugen. Sowohl die nicht geradlinig verlaufende Bewegung des Massenschwerpunktes des Wägegutes als auch die Drehschwingung, die durch die

Drehfederkonstante und das Trägheitsmoment bestimmt wird, führt zu Zentrifugalkräften, welche das Wägeergebnis verfälschen. Die Verfälschung ist dabei quadratisch von der Schwingamplitude abhängig. Weiterhin erzeugen alle drehenden Teile Störkräfte aufgrund ihrer Unwucht. Klassische Auswuchttechniken definieren Wuchtgüten für verschiedene Geräteklassen. Die in der DIN-ISO 1940 definierte feinste Wuchtklasse (0.4) für Kreiselinstrumente übersteigt die zulässige Wägetoleranz in typischen Fällen um den Faktor 20 bis 100. Hier sind nur mit adaptierter Auswerteelektronik höhere Messgeschwindigkeiten bei gegebener Präzision erreichbar. Theoretisch wurde nachgewiesen, dass durch das Erfassen der Position des Wägegutes und der Transportgeschwindigkeit eine deutliche Unterdrückung der Unwucht- und Drehsteifigkeitsstörungen möglich ist. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass

- die Kenntnis des mechanischen Systems mit seinen Eigenschwingungsformen und Frequenzen entscheidend sowohl für den dynamischen, als auch für den statischen Messfehler sind.
- Die Nutzung von Zusatzinformationen (Frequenzen, Schwingungsformen, Positionen, Drehzahlen) in der elektronischen Hard- und Software entscheidende Verbesserung bezüglich geringerer Messzeit und höherer Präzision ermöglicht (Multi-Signalauswertung).

Somit sind wichtige Ansätze für weitere Forschungsarbeiten gegeben.

Präzisions-Kraftmess- und Wägeverfahren

Zu den Präzisionswaagen zählen Waagen mit einer Auflösung von mehr als 10 000 Schritten. Zwei Funktionsprinzipien haben sich in dieser Gruppe durchgesetzt. Das ist zum einen das Prinzip der „Elektromagnetischen Kraftkompensation“ (EMK-Waagen) im High-end Bereich und zum anderen das Prinzip der „Verformungsdetektion mittels Dehnungsmessstreifen“ (DMS-Waagen) im low-end Bereich. Andere Prinzipien wie z.B. „Schwingende Saite“, „Magnetoelastische Kraftsensoren“, oder „Gyroskopische Kraftsensoren“ haben nur eine untergeordnete Bedeutung. Tendenziell könnten alternative Prinzipien aufgrund der erreichbaren Auflösungen und Herstellungskosten aber durchaus einen Platz zwischen den DMS-Waagen und den EMK-Waagen einnehmen. Kommerziell verfügbare DMS-Waagen bestehen derzeit aus einem Verformungskörper aus Metall mit aufgeklebten Foliendehnungsmessstreifen. Dieses Prinzip hat sich bewährt und bietet Auflösungen von bis zu 150 000 Schritten. Dabei wird ein großer Lastbereich von 100 g bis 500 t abgedeckt. Besonders das Problem der Klimaabhängigkeit spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Temperatureinflüsse wirken sich auf den Nullpunkt und auf die Empfindlichkeit der Wägesysteme aus. Aber auch Einlauf- und Kriechverhalten sind temperaturabhängig. Besonders bei den niederlastigen DMS-Systemen (bis ca. 200 g Maximallast) kommt zu der Temperaturabhängigkeit das Problem der Feuchteabhängigkeit hinzu. Die Auswirkungen der Feuchteabhängigkeit können durchaus in der gleichen Größenordnung wie Temperaturwirkungen liegen. Auch die Wechselwirkungen zwischen Temperatur- und Feuchteabhängigkeit, die aus der temperaturabhängigen Feuchtebelastung von Feststoffen (Kleber, DMS) resultieren, müssen in Zukunft Berücksichtigung finden, um das Potenzial der DMS-Systeme besser auszuschöpfen. Die EMK-Waagen erreichen derzeit Auflösungen bis 50 Mio. Schritte. EMK-Waagen sind typische mechatronische Systeme. Nur das perfekte Zusammenspiel zwischen Präzisionsmechanik, Analog- und Digitalelektronik und digitaler Signalverarbeitung ermöglicht die geforderten messtechnischen Eigenschaften. Aufgrund des komplexen mechanischen Aufbaus ist hierbei ein Übergang von manufakturartiger Handfertigung zu komplexen monolithischen Systemen zu beobachten. Die Sartorius AG erzeugt diese komplexen Geometrien durch Präzisionsfräsen, die Mettler Toledo AG vor allem durch elektroerosives Abtragen.

Durch diese Hochtechnologien wurden die manuellen Montageschritte drastisch verringert, eine sehr hohe Fertigungsgenauigkeit, eine sehr hohe Fertigungseffizienz und sehr gute wägetechnische Eigenschaften erreicht. Aufgrund des monolithischen Aufbaus verringerte sich beispielsweise der Einfluss von Temperaturänderungen (durch geringere Temperaturgradienten im System und durch homogenes Ausdehnungsverhalten) signifikant. Das ist ein Beispiel für Innovationen in der Wägetechnik. Mit deutlich gesenkten Kosten werden leistungsfähigere Produkte gefertigt. Für die Genius-Waage wurde die Sartorius AG mit dem Innovationspreis ausgezeichnet. Aber gerade auf dem Gebiet der EMK-Waagen ist noch ein erhebliches Forschungs- und Entwicklungspotenzial vorhanden. Die hohe Integration von Mechanik, Elektronik und Signalverarbeitung stellt eine große Herausforderung für die Verbesserung wägetechnischer Eigenschaften dar, da die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung in rückgekoppelten komplexen Systemen kaum trennbar sind. Einen Ansatz zur besseren Separation der unterschiedlichen Anteile bietet der Aufbau volldigitaler, „hardware in the loop“ Wägesysteme, in denen die parallele Überwachung und Anregung aller relevanten Baugruppen und Zustände möglich wird (Multi-Signalauswertung). Ebenso könnte das bisherige analoge Regelsystem durch digitale Algorithmen verbessert werden. Die Problematik der Dynamikverbesserung durch schnellere mechanische Systeme und effizientere Filteralgorithmen steht unabhängig von der Art des Wägeprinzips zur Debatte. Eine weitere begrenzende Baugruppe ist der sogenannte Nulllageindikator, der die exakte Position des Hebelsystems überwacht. Um höchste Auflösungen zu erreichen, sind Positionierungsunsicherheiten im Nanometerbereich notwendig. Der Nulllageindikator besteht zumeist aus einem optoelektronischen System mit ortsfester IR-Sendediode, ortsfester Doppelphotodiode und einem beweglichen Spalt am Hebelsystem. Probleme resultieren hierbei z.B. durch die entstehende Verlustleistung der IR-Sendediode beim Einschalten der Waage, durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der optoelektronischen Bauteile und des Wägesystems und durch eine Feuchteabhängigkeit aufgrund der Kleberschichten. Insgesamt beruht die Feuchteabhängigkeit von EMK-Waagen auf verschiedenen Ursachen. Beispielsweise sorbiert der Lackdraht der Kompensationsspule Wasser aus der Umgebungsluft. Aus der damit verbundenen Masseänderung der Spule resultiert eine Abhängigkeit der Waagenanzeige von der Luftfeuchte. Die Problematik der Weiterentwicklung der EMK-Systeme ist im Rahmen dieses Projektes eng mit den Komparatorwaagen verbunden, da in Komparatorwaagen das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation umgesetzt wird.

Komparatorwaagen

Komparatorwaagen ermöglichen den Vergleich zweier oder mehrerer Massestücke mit höchstmöglicher Genauigkeit. Gegenwärtig sind Auflösungen bis 10^{-9} kommerziell verfügbar. Komparatoren dieser Auflösung werden in Kalibrierlaboren zur Darstellung der Masseskala, ausgehend vom Urkilogramm, sowie zur Forschung und zur Qualitätssicherung weltweit benötigt. Wichtige Teile von Komparatoren sind automatische Lastwechselvorrichtungen, Massestückzentriereinheiten und Substitutionsgewichtsschaltungen. Erhöhte Anforderungen an die Messgeschwindigkeit, eine immer größer werdende Geometrievielfalt von Prüfgewichten und die Entwicklung hochauflösender Messsysteme für die Wägetechnik führte dazu, Komparatoren in oberschalliger Ausführung zu entwickeln. Deshalb werden in den letzten Jahren häufig Standardmikrowaagen zu High-Tech-Produkten weiterentwickelt. Dieses Tuning besteht darin, einzelne technische Parameter der Serienprodukte dahingehend zu verändern, dass eine für die Vergleichsmessung bestmögliche Funktion erreicht wird. Die Feinabstimmung erfolgt an nahezu allen Komponenten des Komparators.

Das Aufsetzen eines Prüfgewichtes auf verschiedene Punkte einer overschaligen Waagschale erzeugt beim Vorhandensein einer Ecklastempfindlichkeit ortsabhängige Anzeigewerte. Dieser sogenannte Ecklastfehler kann dadurch minimiert werden, dass das Prüfgewicht immer auf ein und dieselbe Stelle der Waagschale abgesetzt wird, oder aber ein Selbstzentriermechanismus (Centermatic) das Gewicht zwangspositioniert. Es gibt unterschiedliche Wirkprinzipien solcher Zentriermechanismen. Als bekannteste Ausführung existieren klassische unterschälige Gehänge. In neuerer Zeit wird diese Zwangszentrierung für overschalige Waagen durch rollen- oder federgelagerte Zentriermechanismen erzielt. Diese haben den Vorteil, dass sie aufbaubedingt keine seitlichen Einschränkungen an die Gewichtsgeometrie stellen. Je nach Anforderungen an die Rückkehrgenauigkeit (Reproduzierbarkeit) dieser Zentriereinrichtung, wird das günstigste Wirkprinzip eingesetzt. So sind federgelagerte Centermatics aufgrund der fehlenden inneren Reibung und der damit verbundenen besseren Rückkehrgenauigkeit für hochgenaue Massenvergleiche am besten geeignet. Eine weitere wichtige Funktion der Zentriereinrichtungen ist, einen automatisierten Massevergleich zu ermöglichen. Hierbei wird mittels eines programmgesteuerten Lastwechslers abwechselnd Prüfling und Referenzgewicht auf die Waagschale gesetzt. Die Centermatic sorgt aufgrund ihrer Kinematik dafür, dass eine beliebige Anzahl von aufeinanderfolgenden Messungen durchgeführt werden kann, ohne dass die Gewichte ihre Position auf der Lastschale wesentlich verändern. Um die Reproduzierbarkeit (Rückkehrgenauigkeit) von verschiedenen Centermatics für einen 10 kg/10 µg Massekomparator zu bestimmen, wurden in Kooperation zwischen SIOS Meßtechnik GmbH und Institut Prozessmess- und Sensortechnik verschiedene Belastungsfälle simuliert. Dabei sind einerseits die Ecklastempfindlichkeit der Waage ermittelt und andererseits vorhandene Centermatics mittels einer speziell entwickelten Koordinaten-Messeinrichtung auf ihre Rückkehrgenauigkeit in X-Y-Richtung hin überprüft worden. Auffällig an diesen Untersuchungen war, dass es einen deutlich sichtbaren Vorzugsbereich von ermittelten Schwerpunktkoordinaten einer Centermatic bei häufig wiederholtem Lastwechsel gibt. Schlägt man einen Kreis um diesen Vorzugsbereich und bezeichnet dessen Radius als Ecklastradius, erhält man einen Wert für die zulässige Ecklastempfindlichkeit der zur Anwendung kommenden Waage. Im Umkehrschluss lässt sich die erforderliche Reproduzierbarkeit für die Weiterentwicklung einer Centermatic ableiten. Bei einer Außermittigkeit des 10kg-Prüfgewichtes von wenigen Millimetern zeigt sich realistisch an der Waagenanzeige eine Abweichung von einigen hundert Anzeigeschritten. Diesen Fehler zu kompensieren ist Aufgabe der Centermatic.

Zwecks Reduzierung störender Umgebungseinflüsse durch Bedienpersonal und den damit verbundenen Messwertänderungen, z.B. beim Öffnen der Wägeraumtüren, werden immer häufiger automatische Lastwechsler eingesetzt. Ihre Entwicklung bewirkt neben verbesserter messtechnischer Leistungsfähigkeit auch eine verbesserte Umsetzung von ökonomischen Ansprüchen (Zeiteinsparung, Personalreduzierung) bei Vergleichsmessungen, die in immer stärkerem Maße kommerziell von verschiedensten staatlichen und privaten Institutionen durchgeführt werden. Einen weiteren Vorteil bietet die rechnergestützte Auswertung der Massevergleiche, welche in der Regel von der Steuereinheit des Lastwechslers per Software durchgeführt und protokolliert wird. Mittels eines angeschlossenen PCs kann die Wäganlage vernetzt und dezentral gesteuert werden. Dies ist insbesondere bei hochgenauen Massevergleichen sinnvoll, wenn im Labor quasi Reinraumbedingung herrscht. Hier ergibt sich somit ein ganzer Komplex wissenschaftlich- technischer Fragestellungen.

Literatur

- Becker, W.; Siebert, P.: *Elektromechanische Kompensationswaage mit modellgestützter Messung des Wägegutes*. In: tm–Technisches Messen 58 (1991), Nr. 5, S. 202–208
- Berg, C.: *Grundlagen der Wägetechnik*. Sartorius AG, 1993
- Best, R.: *Digitale Meßwertverarbeitung*. München : R. Oldenburg Verlag, 1991
- Beuke, D.: *Analyse des Schwingungsverhaltens gleicharmiger Balkenwaagen durch rechnergestützte Identifikation, Simulation und Parameterschätzverfahren*. TU Braunschweig, Dissertationsschrift, 1989
- Müller, C. P.; Schiehlen, W. O.: *Linear vibrations – a theoretical treatment of multidegree-of-freedom vibrating systems*. Dordrecht, Nijhoff, 1985
- Elsarnagawy, T.: *Ringtorsionskraftmeßzelle mit symmetrischem Lichtwellenleiter-Interferometer*. Technische Universität Braunschweig, Dissertationsschrift, 2000
- Faulkner, L.: *Handbook of machinery dynamics*. Marcel Dekker, New York, 2001
- Fritzen, C.-P.: *Ein Beitrag zur Identifikation der Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen linearer mechanischer Systeme*. Universität Kaiserslautern, Dissertationsschrift, 1986
- Gatti, P. L.; Ferrari, V.: *Applied structural and mechanical vibrations – theory, methods and measuring instrumentation*. E & FN Spon, London, 1999
- Hoffmann, K.: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen*. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1987
- Jost, G.: *Das Schätzen von Signalparametern aus gestörten Meßsystemen und der Einsatz bei der Fahrtverwägung*. TH Karlsruhe, Dissertationsschrift, 1980
- Kochsiek, M.: *Handbuch des Wägens*. Vieweg Verlag, 1989
- Kochsiek, M.: *Grundlagen der Massebestimmung*. Mettler-Toledo AG, 1991
- Kochsiek, M.; Gläser, M.; et al.: *Comprehensive Mass Metrology*. Wiley-VCH, Berlin, 2000
- Krebs, V.: *Nichtlineare Filterung*. Oldenburg Verlag, München, 1980
- Maas, S.: *Dynamische Strukturanalyse eines gekoppelten elektromechanischen Meßsystems*. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 11, Nr.162, VDI Verlag Düsseldorf, 1992
- Hurmuzlu, Y. (Editor); Nwokah, O. (Editor): *The mechanical systems design handbook – modeling, measurement, and control*. Boca Raton, Fla., CRC Press, 2002
- Pfeiffer, A.: *Integrierter χ^∞ -Regler/Filterentwurf für elektromechanische Präzisionswaagen*. Fortschritt Bericht Nr. 573, VDI-Verlag, 1996
- PTB-Bericht MA-40: *Guide to mass determination with high accuracy*. Braunschweig, April 1985. S. 31–35
- Schmidt J.: *Entwurf von Reglern zur aktiven Schwingungsdämpfung an flexiblen mechanischen Strukturen*. TH-Darmstadt, Dissertationsschrift, 1987

- Szemplinska-Stupnicka, W.: *Advanced concepts and applications to multi-degree-of-freedom systems*. Dordrecht, Kluwer, 1980
- Weyhe, S.: *Wägetechnik im Labor*. Sartorius, Verlag Moderne Industrie, 1997

Ausgewählte Veröffentlichungen des Institutes für Prozessmess- und Sensortechnik auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik

- Fehling, T.; Fröhlich, T.; Heydenbluth, D.: *Der Massekomparator – Hochgenaue Massebestimmung an der Grenze des technisch Möglichen*. In: 44th International Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, 1999
- Fröhlich, T.; Blumröder, G.: *Bestimmung der Verhältnisse der Zeitkonstanten zweier Trägheitsglieder erster Ordnung aus der Differenz der Sprungantworten*. In: Technisches Messen 65 (1998), Nr. 9, S. 319–321
- Fröhlich, T.; Blumröder, G.: *Dynamische Temperaturkompensation von Präzisionsmeßgeräten*. In: 44th International Scientific Colloquium Technische Universität Ilmenau, 1999
- Fröhlich, T.; Hilbrunner, F.; Blumröder, G.; Jäger, G.; Berg, Ch.: *Improvement of the metrological properties of a laboratory balance through dynamic temperature compensation*. In: Proceedings 8th International Symposium on Temperature TEMPMEKO, VDE Verlag, 2001
- Fröhlich, T.; Jäger, G.: *Dynamische Temperaturkompensation von Präzisionsmeßgeräten*. In: Technisches Messen 67 (2000), Nr. 4, S. 166–170
- Fröhlich, T.: *Dynamische Temperaturkompensation von Präzisionsmeßgeräten*. Technische Universität Ilmenau, Dissertationsschrift, Mai 1998
- Hilbrunner, F.: *Ein Beitrag zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten*. Technische Universität Ilmenau, Dissertationsschrift, 2005
- Jäger, G.: *Interferenzoptische Kraftsensoren*. In: Handbuch der physikalisch-technischen Kraftmesstechnik, Vieweg Verlag, 1993
- Jäger, G.: *Eichfähige lichtwellenleitergekoppelte interferenzoptische Kraftsensoren und Wägezellen*. In: Sensor Magazin (1/1990), Nr. 1. Teil, S. 23–25
- Jäger, G.: *Interferentielle digitale Wägesysteme*. In: Messen Steuern Regeln 21 (1978), S. 688–690
- Jäger, G.: *Elektronische interferentielle Kraftsensoren und ihre Anwendung in Wägezellen*. In: Feingerätetechnik 32 (1983), S. 243–245
- Jäger, G.: *Calibratable Optical Interference Force Sensors and Weighing Cells Coupled By Optical Fibres*. IMEKO Conf. Mass and Force Measurement, Ungarn, 1990
- Jäger, G.: *High-Speed Weighing Engineering*. 13th Internat. Conference on Force and Mass Measurement, Helsinki, 1993

- Jäger, G.: *Eichfähige lichtwellenleitergekoppelte interferenzoptische Kraftsensoren und Wägezellen*. In: Sensor Magazin (2/1990), Nr. 2. Teil, S. 37–39
- Jäger, G.: *Ein Beitrag zur dynamischen Wägetechnik*. In: Wägen + Dosieren (2/1994), S. 3–9
- Jäger, G.: *Lichtwellenleitergekoppelte interferenzoptische Kraftsensoren und Wägesysteme*. In: Technisches Messen 54 (5/1987), S. 200–203
- Jäger, G.: *Ein Beitrag zur Fehlerbetrachtung digitaler Wägesysteme*. In: Feingerätetechnik 26. Jahrgang (6/1977), S. 263–265
- Jäger, G.: *Interferenzoptische Kraftsensoren - eine neue Konzeption für die Kraftmess- und Wägetechnik*. In: Technisches Messen 52. Jahrgang (9/1985), S. 317–320
- Jäger, G.; Füßl, R.: *Interferenzoptische Waagen für dynamische Prozesse*. In: Sensoren und Messtechnik ITG-Fachbericht 148 (1998), S. 139–144
- Jäger, G.; Füßl, R.: *Schnelle interferenzoptische Wägezellen für kleine Lasten*. In: Wägen + Dosieren (4/1997), S. 6–10
- Jäger, G.; Füßl, R.: *Interference-optical force sensor for small forces*. In: Book of Summaries XVII. IMEKO World Congress Dubrovnik, Croatia (6/2003), S. 32
- Jäger, G.; Füßl, R.; Gerhardt, U.: *Optical interference force measuring and weighing Cells for the dynamic weighing of small loads*. IMEKO-XV-World Congress, Osaka (1999)
- Jäger, G.; Füßl, R.; Gerhardt, U.; Sommer, K.-D.: *A new method for the automatic testing of applanation tonometers*. In: Proceedings, Volume VII XVI. IMEKO-World Congress Wien (9/2000), S. 51–56
- Kleinschmidt, U.: *Die Verwendung von Parameterschätzverfahren zur Messzeitverkürzung bei der Temperaturmessung in Metallschmelzen und bei Wägeprozessen*. TU Ilmenau, Dissertationsschrift, 1991
- Krause, L.: *Dynamische Wägetechnik*. Wissenschaftl. Verlag, Berlin, 2005

Patente im Kontext des Projektes

- Jäger, G.; Füßl, R.: DE19939348A1 – *Verfahren und Vorrichtung zur Kalibrierung von Applanationstonometern*. August 1999
- Mettler Toledo: DE8905537U1 – *Waage mit elektromagnetischer Lastkompensation*. 1889
- Mettler Toledo: DE3244853C2 – *Elektromagnetisch kompensierende Waage*. 1982
- Mettler Toledo: DE3324402C2 – *Waage mit elektromagnetischer Kraftkompensation*. 1983
- Mettler Toledo: DE3716615C2 – *Kapazitiver Positionsdetektor an einer elektromagnetisch kraftkompensierenden Waage*. 1987
- Mettler Toledo: DE3889253T2 – *Digitale Einrichtung zum Kompensieren der Lastverschiebung*. 1988
- Mettler Toledo: DE29517368U1 – *Massenkomparator mit automatischer Gewichtswechsellvorrichtung*. 1995
- Mettler Toledo: DE10128942A1 – *Integrierender A/D-Wandler*. 2001
- Mettler Toledo: DE10153603A1 – *Differenzmessschaltung sowie Regeleinrichtung und Waage*. 2001
- Mettler Toledo: DE10159418B4 – *Waagschale und Bestückungs-Plattform für eine Waage sowie Massenkomparator mit einer solchen*. 2001
- Mettler Toledo: EP1384980A1 – *Feuchtigkeitsschutz für einen elektromechanischen Wandler*. 2002
- Mettler Toledo: EP1560004A1 – *Spule mit Feuchtigkeitsschutz durch Ausgleichsschicht und Schutzschicht*. 2004
- Mettler Toledo: EP1560011A1 – *Dehnmessstreifen mit Feuchtigkeitsschutz durch inhomogene anorganische Schicht auf glättender Polymerschicht (ORMOCER) und Schlitzanordnung*. 2004
- Sartorius AG: CH646787A – *Waage nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation*. 1980
- Sartorius AG: CH689285A – *Elektrische Waage mit Korrektur des Feuchteinflusses*. 1994
- Sartorius AG: CH689739A – *Oberschalige Waage nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation*. 1995
- Sartorius AG: CH692867A – *Oberschalige Waage mit einer Parallelführung nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation*. 1995
- Sartorius AG: DE10222438A1 – *Vorrichtung und Verfahren zur Einstellung oder Regelung der Gasfeuchte in nahezu abgeschlossenen Räumen*. 2003
- Setra Systems: WO90/04153 – *Humidity control system for a scale*. August 1989

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für das Forschungsvorhaben wurden mit den folgenden Unternehmen Forschungsschwerpunkte für eine gemeinsame Bearbeitung definiert:

- SIOS Meßtechnik GmbH
- PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH
- Sartorius AG
- ERNO Wägetechnik GmbH
- Doschek Ingenieurbüro für Wägetechnik und Handelsvertretung

Die folgenden regionalen Unternehmen, waren an einer Kooperation im Rahmen des Projektes interessiert, es wurden jedoch keine konkreten Themenschwerpunkte vereinbart:

- Schönfelder Kassenwaagen GmbH und
- VELOMAT Messelektronik GmbH

Während der Projektbearbeitung fokussierte sich die Zusammenarbeit auf die drei Schwerpunktpartner SIOS Meßtechnik GmbH, PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH und Sartorius Weighing Technology GmbH als Tochter der Sartorius AG Göttingen.

SIOS Meßtechnik GmbH

Adresse: Am Vogelherd 46
98693 Ilmenau
Tel.: 03677-64470



Geschäftsführer: Dr. Walter Schott

Gründung: 1991

Produkte:

- Laserinterferometrische Längenmesstechnik
- Nanomess- und Positioniermaschinen
- Laserinterferometrische Vibrometer
- Stabilisierte He-Ne-Laser
- Dynamische Wägetechnik
- Komparatorwägetechnik
- Spezielle Kalibrier- und Prüfgeräte



PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH



Adresse: Bahnhofplatz 4
99195 Erfurt - Stotternheim
Tel. 036204/569-0

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Peter Pölzing

Gründung: 1998

Niederlassung in Dresden: 1999

Niederlassung in Berlin: 1999

Niederlassung in Rostock: 2002

Produkte:

- Straßenfahrzeugwaagen
- Achslastwaagen
- Gleiswaagen
- Förderbandwaagen
- Bodenwaagen, Kleinwaagen
- Radladerwaagen
- Waagenzubehör:
 - Drucker
 - Fernanzeigen
 - Selbstbedienterminals
 - Wägeelektroniken
 - Überspannungsschutz, Blitzschutz
 - Waagenfernbedienungen

Sartorius Weighing Technology GmbH

Tochterfirma der Sartorius AG Göttingen



Adresse: Weender Landstrasse 94-108
37075 Göttingen
Tel.: 0551-3080

Geschäftsführer: Herr Dr. Joachim Kreuzburg

Gründung: 1870

Börsengang: 1960

Abspaltung von der Sartorius AG: 2010

Geschäftsfelder:

- Prozesstechnik
- Laborgeräte, Laborlösungen
- Wägezellen
- Waagen: Labor-, Industrie- und Bandwaagen
- Massekomparatoren
- Märkte: Lebensmittel, Pharma, BioPharma, Chemie, Wissenschaft

Zusammenarbeit an der TU Ilmenau

Seitens der InnoProfile-Initiative IKWI wurde im Rahmen des Forschungsprojektes mit verschiedensten Fachbereichen an der TU Ilmenau zusammengearbeitet. Hierzu zählen beispielsweise Fachbereiche:

- Mikrorechnertechnik
- Regelungstechnik

Im Januar 2010 startete eine intensive Zusammenarbeit mit den Folgenden Fachbereichen im Rahmen des interdisziplinären DFG-Graduiertenkollegs „Lorentzkraftanemometrie¹“:

- Emmy-Noether Gruppe Strömungsbeeinflussung und Simulation
- Theoretische Elektrotechnik
- Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe
- Biomedizinische Technik
- Thermo- und Magnetofluidodynamik
- Elektrothermische Energiewandlung
- Theoretische Strömungsmechanik
- Technische Mechanik

¹ <http://www.tu-ilmenau.de/lorentz-force/>

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung

Im Folgenden sind die wesentlichen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse nach Arbeitspaketen sortiert (siehe Tabelle 1) aufgeführt.

AP1 – Aufbau eines Demonstrators aus Mechanik, elektronischer Hardware und Software, Rapid Prototyping und Hardware in the Loop

Waagen mit dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation stellen derzeit das Maß der Dinge bezüglich Messunsicherheit und erreichbarer Auflösung dar. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau einer solchen Waage und ihrer Komponenten dargestellt.

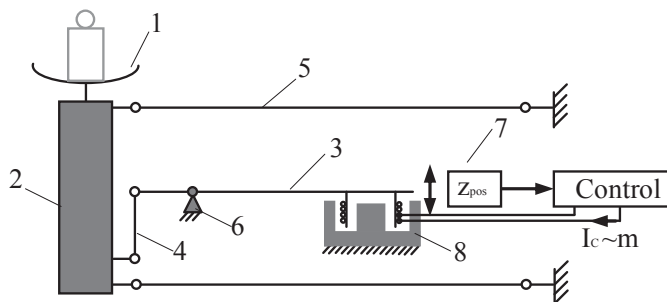


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer EMK-Waage mit Waagschale 1, Koppelstück 2, Waagenhebel 3, Koppelband mit Federgelenken 4, Parallelenker mit Federgelenken 5, Hebellsystem 6, Lagesensor 7 sowie Spule-Permanentmagnet-System 8

Durch Auflegen einer Masse bzw. Aufbringen einer Kraft senkt sich die Waagschale (1), parallel durch die Lenker (5) geführt, ab. Der Waagenhebel (3) überträgt diese Bewegung mit einer definierten Übersetzung h . Die Auslenkung des Hebels wird mittels eines Lagesensors (7) detektiert. Dieses Lagesignal ist Eingangssignal für einen Regler, der einen Strom durch die Spule (8) treibt. Die resultierende Lorentzkraft wirkt der Gewichtskraft entgegen. Der Reglerstrom ist damit im eingeregelter Zustand (der Hebel befindet sich wieder in der Nulllage) ein Maß für die zu bestimmende Masse/Kraft.

Der Stand der Technik ist die Ausführung des Reglers in analoger Form. Diese Ausführung hat den Vorteil, dass ein analoger Regler kostengünstig realisierbar ist und bei robuster Auslegung zu zufriedenstellenden Messzeiten und Auflösungen führt. Die Nachteile eines analogen Reglers bestehen darin, dass er sehr robust und konservativ ausgelegt werden muss, um Charginchwankungen der elektrischen Bauteile und der Waagen, sowie Umwelteinflüsse und Aufstellbedingungen kompensieren zu können – ein einziger Regler muss all diese Eventualitäten abdecken können. Unter diesen Umständen kann nie ein optimaler Regler ausgelegt werden. Ein weiterer Nachteil dieses Konzeptes besteht darin, dass der Regler nicht ohne erheblichen Aufwand an andere Anwendungen bzw. andere Forderungen angepasst werden kann. Auch können nur sehr konventionelle Reglerkonzepte wie PID bzw. PIDT1-Regler realisiert werden.

Viele dieser Nachteile können durch den Einsatz eines digitalen Reglers ausgeglichen werden. Hierbei wird das Eingangssignal in Form des Lagesignals mit einem Analog-Digital-Umsetzer (ADU) in ein diskretes (zeitlich und bezogen auf den Messbereich) Signal gewandelt und in einen Software-Algorithmus der den Regler repräsentiert eingespeist. Dieser Algorithmus läuft auf einem PC bzw. Echtzeitsystem. Das Ausgangssignal welches durch den Algorithmus berechnet wird, wird mittels eines Digital-Analog-Umsetzers (DAU) in einen Strom gewandelt, welcher durch die Spule fließt. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die völlige Freiheit, mit der der Regelalgorithmus und dessen Parametersatz entworfen und dimensioniert werden kann. Hierdurch können Hebelresonanzen, die insbesondere für den Bereich hoher Frequenzen auftreten sehr gut unterdrückt werden, was mit analogen Reglern nur schwer realisierbar ist. Des Weiteren ist eine sehr einfache Anpassung des Reglers an geänderte Umgebungs- und Umweltbedingungen möglich, Zusatzwissen aus simultanen Messungen von Temperatur, Feuchte und Untergrundbeschleunigungen können direkt für die Anpassung des Reglers genutzt werden. Auch kann durch Umschalten der Reglerparameter für unterschiedliche Einsatzbedingungen immer ein optimaler Regler realisiert werden, womit Messzeiten und Auflösungen noch erhöht werden können. Ein weiterer Vorteil von digitalen Regelungen besteht in der Vereinheitlichung der Waagenelektronik, wodurch Entwicklungskosten gespart werden können. Für analoge Regler stellt es ein großes Problem dar, wenn der Waagenhebel durch einen besonders heftigen Lastwechsel in den Anschlag fällt – das System wird dadurch hochgradig nichtlinear und der integrierende Anteil des Reglers wird zunächst kumuliert, was dann zu einem heftigen Überspringen der Waage führt, da dieser Anteil nicht schnell genug umgeladen werden kann. Auch dieses Problem kann digital besser unterdrückt werden, da ein Erreichen des Anschlages verhindert werden kann. Mit den Aufbauten, die im Rahmen des Projektes verwirklicht wurden, konnte zudem tiefere Einsicht in verschiedenste Aspekte gewonnen werden, da zeitsynchron die signifikanten Signale erfasst werden können.

Das Prinzip der Hardware-In-the-Loop (HIL) wurde im Rahmen des InnoProfile Projektes IP512 auf zwei Gebiete der Wägetechnik angewandt: Zum einen kommt es für Komparatorwaagen zum Einsatz, zum anderen für dynamische Waagen.

Anwendung für dynamische Waagen und Komparatorwaagen

Die Anforderungen an die Regelung und damit an die Hardware sind für Komparatorwaage völlig anders als für dynamische Waagen. Da für dieses Projekt kommerziell erhältliche Hardware verwendet wurde, wurden zwei verschiedene Systeme angeschafft, die die jeweiligen Anforderungen möglichst gut abdecken.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden erste Experimente Zur Realisierbarkeit eines Hardware-in-the-Loop-Systems vorgenommen (siehe Tabelle 6: Illert, 2007). Hierzu wurde auf am Institut existierende Hardware zurückgegriffen. Zusätzlich wurde in LabView eine umfassende Software programmiert, mit der die Systemidentifikation der Waage, eine digitale Regelung und die Simulation der Regelung möglich ist (siehe Abbildung 2). Mit diesem Aufbau konnte die Funktionsweise eines HIL-Systems sehr gut demonstriert werden. Folgender Funktionsumfang konnte realisiert werden:

- Einbindung der Geräte Agilent Multimeter 3458A und HP Universal Source 3245A in eine Nichtechtzeit-LabView-Umgebung
- Ermittlung optimaler Gerätekonfigurationen
- Konzeption und Aufbau der notwendigen Analogelektronik zur Anbindung an das Wägesystem
- Umsetzung verschiedener Regelalgorithmen, wie diskreter PID-Regler, allgemeiner Polynomregler und Dead-Beat-Regler mit Stellgrößenbegrenzung

- Maximal realisierte Regelfrequenz: 20 Hz (d.h. quasistatische Regelung)
- Modul zur Streckenidentifikation des Wägesystems mit verschiedenen Erregungssignalen
- Modul zur Simulation unterschiedlicher Reglerkonfigurationen an ermittelten Regelstrecken
- Dokumentation der Ergebnisse

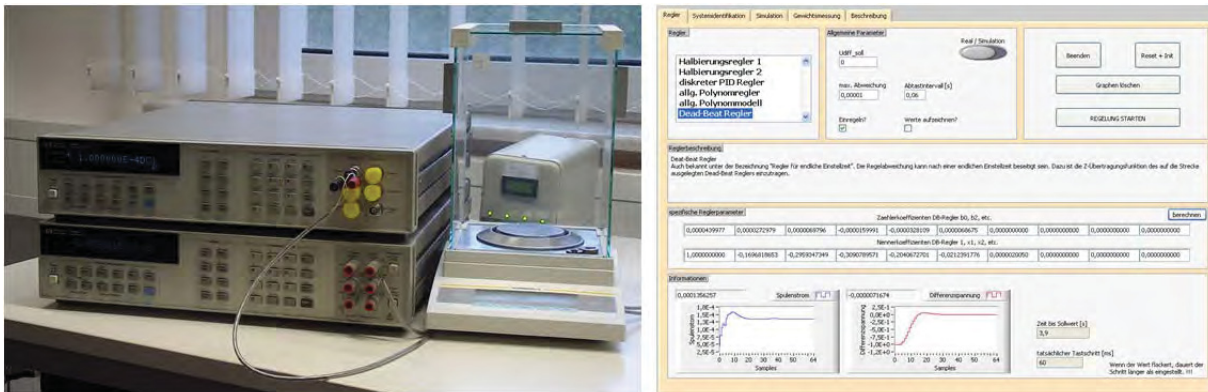


Abbildung 2: HIL-System aus Machbarkeitsstudie

Für dynamische Waagen ist die Anforderung an die Hardware möglichst hohe Samplingraten bei hohen Auflösungen zu erreichen. Zudem müssen die Latenzen der Datenerfassung und Ausgabe möglichst gering sein, da bei einer Regelung immer Einzelpunkte verarbeitet werden: Der Wert der Abtastlage wird eingelesen, verarbeitet und ein Wert in Form eines Spulenstromes wird ausgegeben. Die meisten kommerziell erhältlichen Messkarten zur schnellen Datenein- und Datenausgabe haben im Falle hoher Auflösungen des ADU bzw. DAU große Latenzzeiten – Große Datenkolonnen können mit großen Samplingraten eingelesen oder ausgegeben werden, Einzelwerte werden jedoch immer mit einer großen Verzögerung bearbeitet. Die hohe Auflösung von EMK-Waagen diktiert für ADU und DAU mindestens eine Auflösung von 20 Bit, die Dauer für einen Regelzyklus sollte deutlich unter 1 ms liegen. Diese harten Anforderungen konnten zu keiner Zeit des Projektes von kommerziell erhältlicher Hardware erfüllt werden. Den Forderungen am Nächsten kam die PXI-Einsteckkarte NI-PXI-6289 in einem PXI-System von National Instruments. In diesem PXI-Rack ist ein schneller PC mit einem proprietären Echtzeitbetriebssystem über einen PXI-Bus mit der Messkarte verbunden. Die Messkarte verfügt über einen ADU mit 18 Bit und einen DAU mit 16 Bit. Mit der Karte können bei einkanaliger Messung theoretisch Latenzzeiten von $4\mu\text{s}$ erreicht werden, der PXI-Bus begrenzt die Datenrate jedoch auf $100\mu\text{s}$ pro Regelzyklus. Zur Verfügung stehen damit 16 Analogeingänge und 4 Analogausgänge bei einer Regelfrequenz von 10 kHz. Durch geeignete Filterung kann die Auflösung der Karte noch erhöht werden, womit die gestellten Anforderungen durch das System erfüllt werden können.

Der maximale Ausgangsstrom den der Analogausgang der Karte zur Verfügung stellen kann beträgt ± 4 mA. Um dynamisch regeln zu können sind allerdings mindestens $\pm 20..100$ mA nötig. Um diese Unzulänglichkeit zu überbrücken wurde eine spannungsgesteuerte Stromquelle entwickelt. Diese wird mit der Ausgangsspannung des DAU gespeist und wandelt selbige in einen proportionalen Strom. Hierbei zeigt sie nahezu das Verhalten einer idealen Stromquelle – nach einem maximalen Spannungssprung von 20 V ist der Strom bereits nach $60\mu\text{s}$ auf seinen Endwert eingependelt, womit ein sehr gutes dynamisches Regelverhalten erzielt werden kann. Mit der maximalen Regelfrequenz von 10 kHz kann dieser U/I-Wandler sogar als ideale Stromquelle betrachtet werden. Zudem weist der U/I-Wandler nur ein sehr geringes Rauschen von $4,4\mu\text{A}$ Standardabweichung und eine exzellente

Langzeitstabilität von $5,5 \text{ nA/V}$ über eine Messzeit von 140 min auf. Die maximale Linearitätsabweichung über den gesamten Messbereich beträgt $8 \mu\text{A}$, was mathematisch jedoch sehr gut korrigiert werden kann.

Um die Signale der Differenzphotodiode der Abtastung in ein Lagesignal zu wandeln kommt eine ebenfalls am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik entwickelte und bewährte drift- und rauscharme Brückenschaltung zum Einsatz. Diese Abtastelektronik weist eine maximale Linearitätsabweichung von $3,5 \mu\text{V/nm}$ auf.

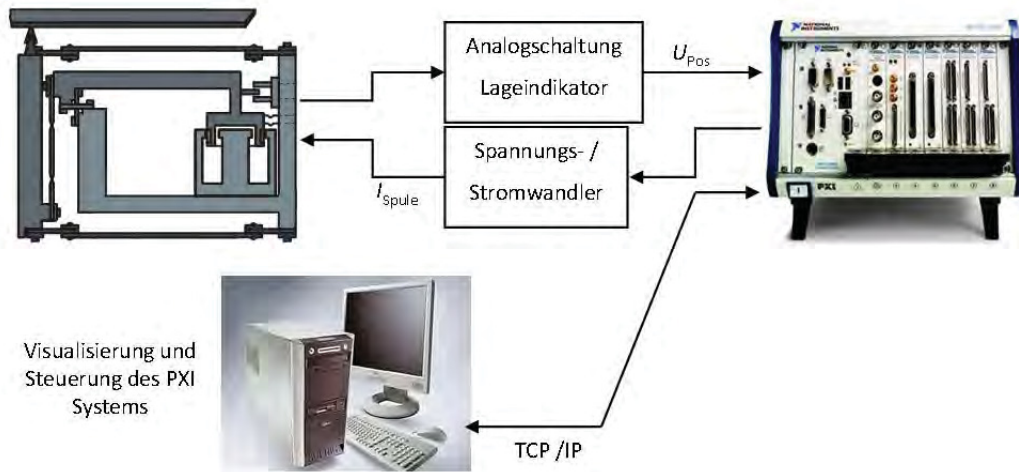


Abbildung 3: Aufbau des HIL-Systems für dynamische Waagen

Die Steuerung des HIL-Systems (siehe Abbildung 3) erfolgt per TCP/IP-Verbindung über einen Host-PC. Zur Bedienung des HIL-Systems wurde eine Software entwickelt, welche aus zwei Teilen besteht: Ein Teil läuft als DLL auf dem Echtzeitbetriebssystem und beinhaltet die Datenein- und Ausgabe, den Regelalgorithmus sowie die Speicherung und Transfer der Daten zum Host-PC. Auf dem Host-PC läuft ein Programm mit einem GUI, über das mit der PXI-Station kommuniziert wird (siehe Abbildung 4).

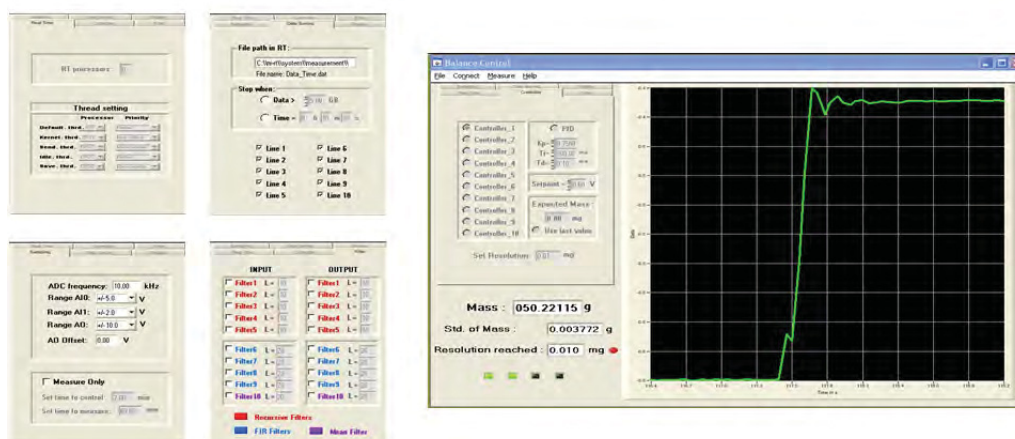


Abbildung 4: GUI zur Bedienung der PXI-Station

Mittels dieser GUI wird zunächst die Verbindung zu der PXI-Station hergestellt, danach können Filter- und Regelalgorithmen ausgewählt werden, Die Art der Datenspeicherung festgelegt werden, Samplingraten und Messbereiche der Ein- und Ausgänge definiert werden sowie Anzahl und Art der anzuzeigenden Messsignale festgelegt werden. Mit der erstellten Soft- und Hardware ist also die komfortable Ansteuerung und Regelung dynamischer Waagen möglich. Während der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurde immer wieder beobachtet, dass Datenpakete vor der Speicherung verloren gehen, was auf Unzulänglichkeiten des PXI-Busses zurückzuführen ist. Diese Fehler sind dem Hersteller bekannt, konnten bis dato aber nicht behoben werden. Des Weiteren begrenzt der PXI-Bus die maximale Samplingrate auf 10 kHz, obwohl die Messkarte theoretisch weit höhere Taktraten zulassen würde. Diese Probleme lassen sich nicht mit kommerziell erhältlichen Geräten beheben, aus diesem Grunde soll in einem möglichen Nachfolgeprojekt eine Hardware entwickelt werden, welche diese Unzulänglichkeiten umgeht.

Die Anforderungen an Hard- und Software welche durch Komparatorwaagen gestellt werden unterscheiden sich von den bereits dargestellten grundlegend. Hier besteht die Forderung nach extrem hohen Auflösungen, geringen Unsicherheiten und einer guten Langzeitstabilität. Die Forderung nach sehr geringen Taktzeiten der Regelung ist hier von untergeordneter Bedeutung. Auch hierfür kam im Laufe des Projektes kommerziell verfügbare Hardware zum Einsatz: Eine steuerbare Stromquelle Agilent 3245A mit einer Auflösung von 22 Bit und ein Multimeter Agilent 3458A mit einer Auflösung von 28 Bit. Diese Geräte stellen die genaueste am Markt verfügbare Hardware dar. In Referenzmessungen konnten damit Standardabweichungen von 4 ng erreicht werden. Nachteilig an dieser Lösung sind die sehr hohen Anschaffungskosten, die durch den GPIB-Bus begrenzte Datenübertragungsrate und die begrenzten Mess- und Ausgaberraten woraus eine maximale Regelfrequenz von 20 Hz resultiert. Trotz dieser limitierenden Faktoren stellt die digitale Regelung für Komparatoren ein immenses Potential dar. Mit dem Aufbau aus Abbildung 5 ist die Realisierung folgender Punkte möglich:

- Vollständige Beobachtbarkeit von Hebellage und Spulenstrom (Gehängependeln)
- Alternatives Konzept – Trennung zwischen mechanischen und elektrischen Effekten
- Einfache Integration unterschiedlicher Regelstrategien und automatischer Vergleich
- Vielfältige Tools zur Identifikation des mechanischen Systems (Federkonstante, Hysterese, Übertragungsverhalten Strom zu Weg und Ähnliches)
- Online-Visualisierung und Signalverarbeitung (mittelwert- und trendfreie Darstellung)
- Untersuchungen zur Multi-Signalauswertung
- Einfache Integration weiterer Komponenten (Ansteuerung Konstantbelastungspiezo, Kommunikation mit Lastwechsler-Software, Erfassung des Gehängependeln)
- Durch Anpassung von Messbereichen – sehr hohe Auflösung und Stabilität
- Vollständige Fernsteuerbarkeit

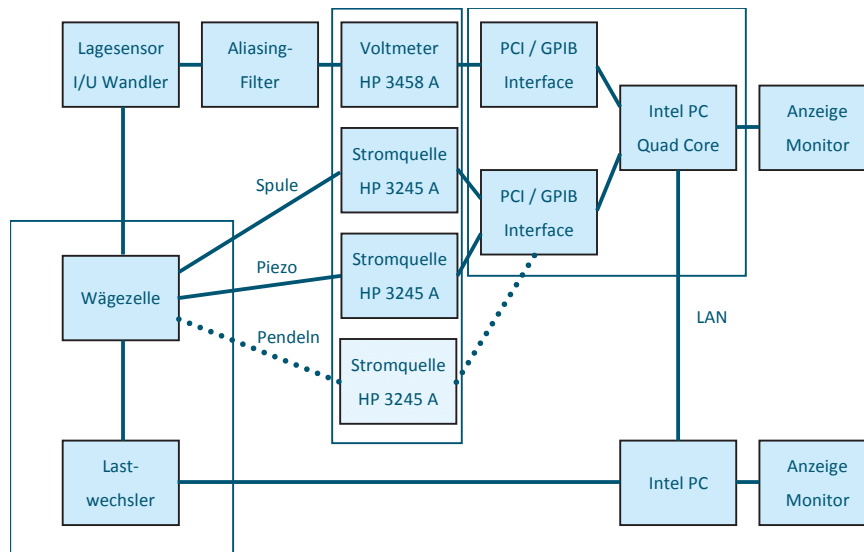


Abbildung 5: HIL-Aufbau zur digitalen Regelung von Komparatoren

Zur Steuerung des HIL-Systems für Komparatoren wurde ebenfalls eine Software mit GUI (siehe Abbildung 6) entworfen. Mit dieser Software können verschiedene Messsignale wie Hebellage, Spulenstrom, gefilterte Anzeige, Jitterzeit, Piezospannung oder die Position des Hubzylinders angezeigt werden; diese Anzeige ist frei konfigurierbar. Es können auch Vorgaben zur Messung gemacht werden wie die Einstellung des Messbereichs des Multimeters bzw. den Strombereich der Stromquelle. Zur Identifikation der Waage kann die Sollage des Hebels vorgegeben werden, bzw. sogar eine ganze Sollwertfolge vorgegeben werden. Um Driften beobachten zu können, kann die Regelung deaktiviert werden.

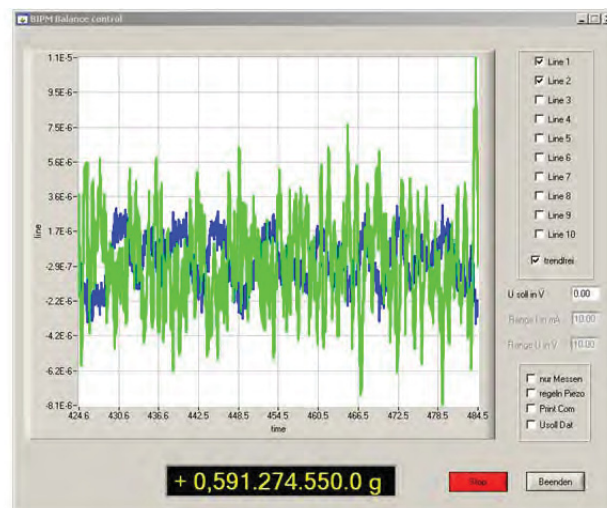


Abbildung 6: GUI zur Steuerung des HIL-Systems für Komparatoren

Erprobung neuer Regelalgorithmen an EMK-Waagen, Untersuchung und Anwendung von nichtlinearen oder adaptiven Strategien

Im Rahmen des Projektes InnoProfile 512 wurden verschiedene Reglerstrategien für EMK-Waagen getestet, unter anderem im Rahmen einer Diplomarbeit [1]. Die analoge Realisierung der Regler von EMK-Waagen erfolgt in den meisten Fällen in Form eines PID- bzw. PIDT1 Reglers. Im ersten Schritt wurde für dynamische Waagen also ein PIDT1-Regler digitalisiert und optimiert. Mit diesem optimierten Regler konnte im Vergleich zu dem Analogregler bereits eine signifikante Verbesserung erzielt werden.

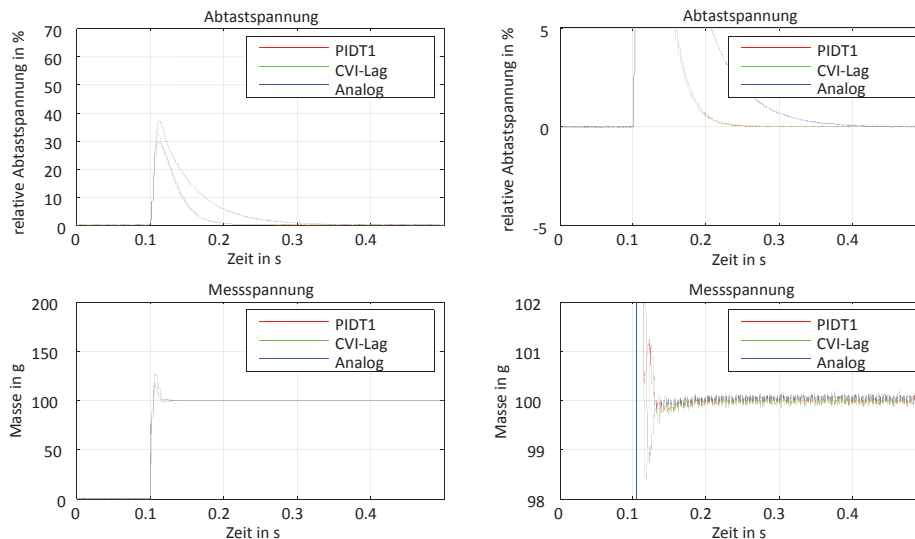


Abbildung 7: Darstellung der Antwort einer dynamischen Waage für digitalisierte PIDT1-Regler und einen analogen Regler auf einen Lastwechsel von der halben Maximallast

Im Vergleich zu dem Analogregler konnte die Zeit bis der Hebel nach einem Lastwechsel in die Nulllage zurückkehrt halbiert werden, die Ausschwingweite des Hebels konnte auf 65% des vorherigen Wertes reduziert werden und die Hebelschwingung wurde reduziert. Die Standardabweichung des ungefilterten Wertes bewegt sich, genau wie die Messzeit im Bereich der Werte die mit dem Analogregler erzielt werden können (siehe Abbildung 7). Dieser Regleransatz wurde auf zwei verschiedene Weisen realisiert: Einmal wurde der Regleralgorithmus als Polynomregler implementiert, für die zweite Variante wurde die Reglerbibliothek genutzt, die von National Instruments bereitgestellt wird. Die Ergebnisse sind gleich gut, jedoch können die in MatLab bestimmten Parameter der Regler unkomplizierter in den Polynomregler implementiert werden, da keine Umrechnung der Ergebnisse mehr notwendig ist.

Im Laufe der Untersuchungen wurde deutlich, dass sich das Übertragungsverhalten der dynamischen Waage in Abhängigkeit der Steifigkeit der Unterlage ändert. Für elastische Unterlagen verschiebt sich eine Eigenfrequenz- und Eigenform des Hebels der untersuchten Waage. Für diesen Fall wurde die Waage im Betrieb mit dem analogen Regler hochgradig instabil, ein Betrieb war nicht mehr möglich. Mit dem Digitalregler konnte ein zweiter Parametersatz gefunden werden, der auch für diese schwierigen Bedingungen zu einem stabilen Schwingungsverhalten der Waage führte. Durch ein einfaches Umschalten zwischen diesen Parametersätzen kann also für jeden Betriebsmodus der Waage ein ideales Verhalten erzielt werden.

Als weiteres Reglerkonzept wurde ein Regler mit endlicher Einstellzeit oder Dead-Beat-Regler untersucht. Hierbei werden Pole und Nullstellen des Systems so kompensiert, dass der Regler nach n Regelzyklen einen Sollwert einstellen kann. Dieser Wert n entspricht dem Grad des Polynoms des Reglers. Dieser Regelalgorithmus kann ausschließlich digital realisiert werden und eignet sich sehr gut um Sollwertvorgaben binnen aller kürzester Zeit und ohne bleibende Regelabweichung zu folgen. Unter

regelungstechnischen Gesichtspunkten muss ein Lastwechsel auf die Waagschale als Einspeisung einer Störung in das System betrachtet werden. Diese Störung gilt es möglichst schnell und präzise zu unterdrücken. Für die Anwendung der Störunterdrückung eignet sich das untersuchte Reglerkonzept nicht. Bereits für Lastwechsel der halben Maximallast kann ein Anschlagen des Hebels im Anschlag nicht verhindert werden. Nichtsdestotrotz sind die Erkenntnisse dieser Untersuchungen für weitere Projekte sehr interessant: Für die Lageregelung bei kombinierter Kraft-Weg-Kennlinienbestimmung ist dieses Reglerkonzept von großem Interesse.

Als drittes Reglerkonzept wurde ein Zustandsregler mit Zustandsbeobachter untersucht (siehe Abbildung 8):

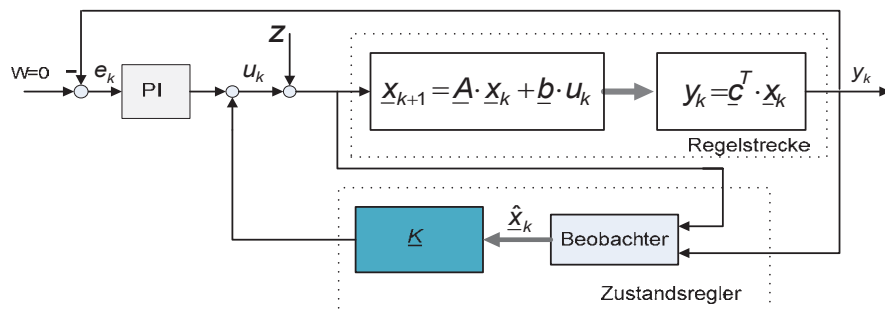


Abbildung 8: Aufbau eines PI-Zustandsreglers mit Zustandsbeobachter

Bei diesem Reglerkonzept werden die Zustände des Systems über einen sogenannten Zustandsbeobachter geschätzt, wobei hierfür reale Ein- und Ausgangsgrößen des tatsächlichen Systems hinzugezogen werden. Diese Zustände werden der Reglermatrix zugeführt. Um eine perfekte Sollwertfolge des Reglers zu realisieren ist ein weiterer PI-Regler in Form eines Vorfilters notwendig. Die erzielten Ergebnisse sind sehr gut. Im Vergleich zu dem Analogregler konnte auch hier die Zeit bis zur Rückkehr des Hebels in die Nulllage nach einem Lastwechsel halbiert werden. Zusätzlich konnte die Standardabweichung des Spulenstromes gegenüber den Messungen mit dem Analogregler auf 85% der vorherigen Wertes gesenkt werden, was bereits eine deutliche Reduktion der Filterung bedeutet und damit eine Verringerung der Messzeit.

Eingangs wurde bereits erwähnt, dass für analoge Regler das Anschlagen des Hebels in der Endlage ein großes Problem darstellt, da das System hierdurch hochgradig nichtlinear wird. Bei digitalen Regelungen kann dieser Effekt durch die Einbringung einer zusätzlichen Nichtlinearität unterdrückt werden. Um den Regler für große Ausschläge des Hebels aggressiver zu dimensionieren, ohne die Charakteristik für den eingeschwungenen Zustand und damit den Moment der Messwerterfassung zu verändern, wird das Abtastsignal mit einem Polynom mit ungerader Ordnung n multipliziert. Hierdurch bleibt die Kennlinie in der Nähe des Nulldurchganges nahezu linear, in der Nähe der Anschläge wird sie hochgradig nichtlinear (siehe Abbildung 10 links – hier für ein Polynom 5. Ordnung). Mit dieser Maßnahme kann der Ausschlag des Hebels für den digitalen PIDT1-Regler gegenüber der lineare Kennlinie um weitere 18% verringert werden. Der Effekt ist für Regler, die einen größeren Hebelausschlag zulassen der Nichtlinearität der Kennlinie entsprechen noch wesentlich größer. Auf diese Art kann für den PIDT1-Regler für jeden Lastwechsel zuverlässig verhindert werden, dass der Waagenhebel den Anschlag erreicht.

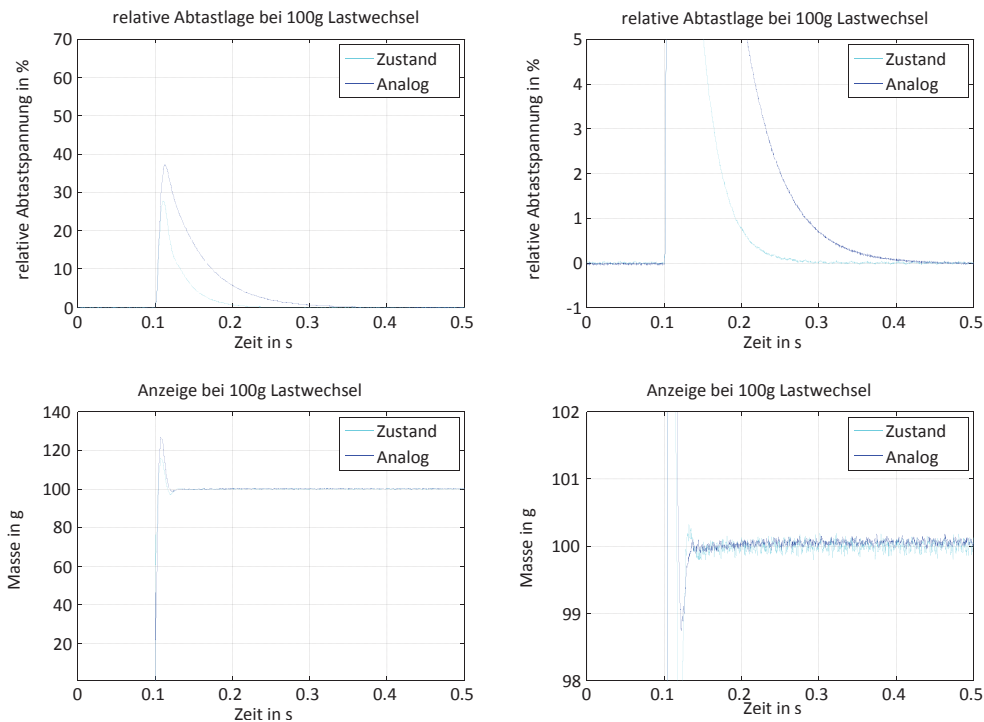


Abbildung 9: Darstellung der Antwort einer dynamischen Waage für einen PI-Zustandsregler und einen analogen Regler auf einen Lastwechsel von der halben Maximallast.

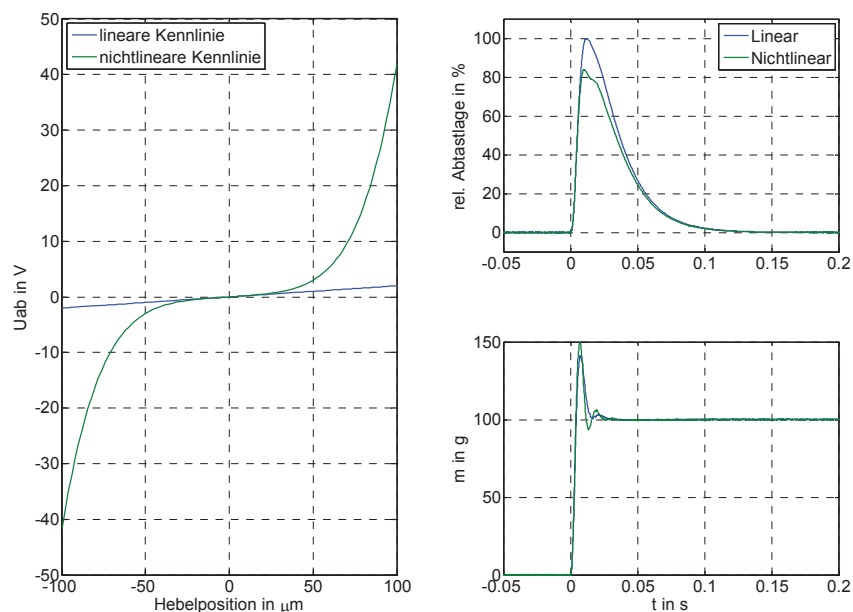


Abbildung 10: Auswirkung einer nichtlinearen Abtastkennlinie auf das Regelverhalten eines digitalen PIDT1-Reglers

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl für den digitalisierten PIDT1-Regler als auch für den Zustandsregler sehr gute Ergebnisse für dynamische Waagen erzielt werden konnten. Mit den digitalen Reglern kann wesentlich besser auf veränderte Umgebungsbedingungen reagiert werden als mit Analogreglern und damit immer ein optimales Reglerverhalten erzielt werden.

AP2 – Untersuchungen zur Multi-Signalauswertung

Sowohl für Komparatoren als auch für dynamische Waagen wurde im Rahmen des Projektes InnoProfile IP 512 eine Peripherie geschaffen, die es erlaubt zusätzlich zu dem aktuellen Strom durch die Spule der Waage diverse weitere Signale simultan aufzuzeichnen. Diese zusätzlich gewonnen Informationen werden in die digitale Regelung der EMK-Waagen integriert.

Integration der Hebelposition in das Wäageergebnis bei EMK-Waagen

Der Grundgedanke zu diesem Arbeitspaket war, dass das Signal des Lageindikators bei analogen Regelungen nicht digital vorliegt, bei digitalen Regelungen jedoch schon und somit als Zusatzinformation genutzt werden kann. Im Falle von Analogregelungen wird nur der Spulenstrom der über einem hochpräzisen Referenzwiderstand abfällt digitalisiert, gefiltert in einen Massewert umgerechnet und zur Anzeige gebracht. Über die Abtastlage ist bei diesem Konzept nichts bekannt. Für die digitale Regelung muss zusätzlich zu der Spannung über dem Referenzwiderstand ebenfalls zwangsläufig die Abtastspannung A/D-gewandelt werden (siehe Abbildung 11).

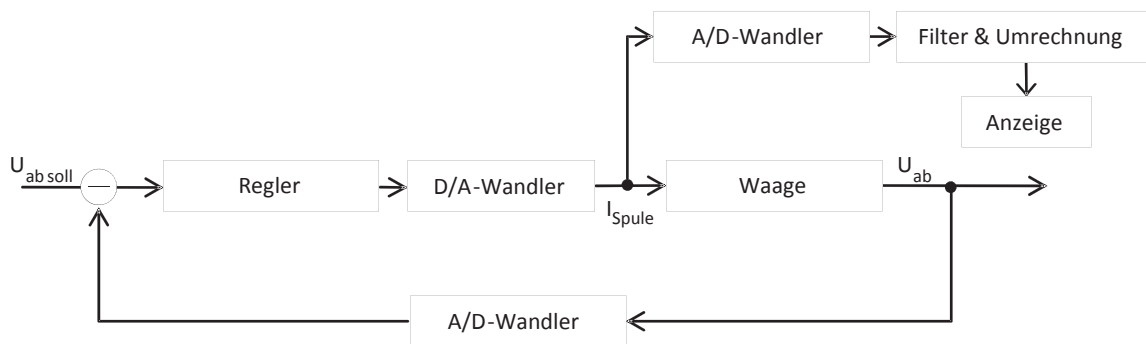


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines digitalen Regelkreises

Aus Abbildung 11 kann auch entnommen werden, dass der Strom durch die Spule direkt aus der Abtastspannung berechnet wird. Die Solllage des Hebels ist immer die Nulllage, das beinhaltet, dass die negative, D/A-gewandelte Abtastspannung den einzigen Eingang für den Regleralgorithmus darstellt. Der Spulenstrom als D/A-gewandelter Ausgang des Reglers ist damit absolut deterministisch aus der Abtastspannung bestimmbar. Damit stellt die Abtastspannung keinerlei Zusatzinformation zur Massebestimmung dar. Im Umkehrschluss kann daraus aber ebenfalls gefolgert werden, dass für low-cost-Anwendungen die Einsparung eines ADU möglich ist, da das Massesignal direkt aus dem Ausgangssignal des Reglers bestimmt werden kann und der Spulenstrom nicht zusätzlich bestimmt werden muss. Diese Prämisse gilt natürlich nur so lange, wie davon ausgegangen werden kann, dass eventuelle Anpassschaltungen nach dem Regler wie beispielsweise U/I-Wandler unterhalb der gewünschten Auflösung driften.

Kaskadierte Filter- und Reglerkonzepte

Im Rahmen des InnoProfile Projektes schloss Frau Svitlana Dontsova ihre Promotion mit dem Prädikat „Summa Cum Laude“ ab [3]. Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung von Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung in der dynamischen Wägetechnik. Alle Betrachtungen beziehen sich auf einen Typ

der dynamischen Waagen, die Kontrollwaage. Die dargelegten Verfahren sind für jeden anderen Waagentyp anwendbar, der für die dynamischen Messungen eingesetzt wird. Die erforderlichen messtechnischen Parameter der Kontrollwaagen anhand der Klassifizierung nach der internationalen metrologischen Empfehlungen OIML R51 und unter Berücksichtigung der Anforderungen der Fertigpackungsverordnung wurden berechnet. Im Störspektrum einer Kontrollwaage spielen harmonische Komponenten eine dominierende Rolle. Ein Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den Untersuchungen dieser Art der Störsignale. Es wurde der Einfluss der Abtastrate auf das Spektrum und die Standardabweichung des Quantisierungsfehlers bei der Signaldigitalisierung erläutert, ein Verfahren zur Ermittlung der tatsächlichen Größe der Aliasingfrequenzen beschrieben, die Änderung der Standardabweichung einer mit einem Mittelwertbildner gefilterten harmonischen Schwingung in Abhängigkeit von der Filterordnung untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt im Entwurf von digitalen Filtern, die als kaskadierte Mittelwertbildner verwirklicht werden. Diese Filterart zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteile aus. Dazu gehören eine einfache Realisierbarkeit, die Möglichkeit zur schnellen Umstellung der Gruppenlaufzeit und die leichte Anpassung an die Signalform. Alle diese Eigenschaften entsprechen den Anforderungen an die digitale Signalverarbeitung in der dynamischen Wägetechnik. Es wurden Algorithmen zum Entwurf der angepassten Filterung auf Basis der kaskadierten Mittelwertbildnerstrukturen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich vorgestellt und verglichen. Hierzu wurde eine Software entwickelt (siehe Abbildung 12), welche den folgenden Funktionsumfang umfasst:

- Generierung eines Testsignals mit unterschiedlichen harmonischen Anteilen und überlagertem Rauschen
- Erprobung und Anwendung verschiedener FIR-Filter
- Analysemöglichkeiten im Zeit- und Frequenzbereich
- Kaskadierung der Filter und Ermittlung der Summenfilterkoeffizienten

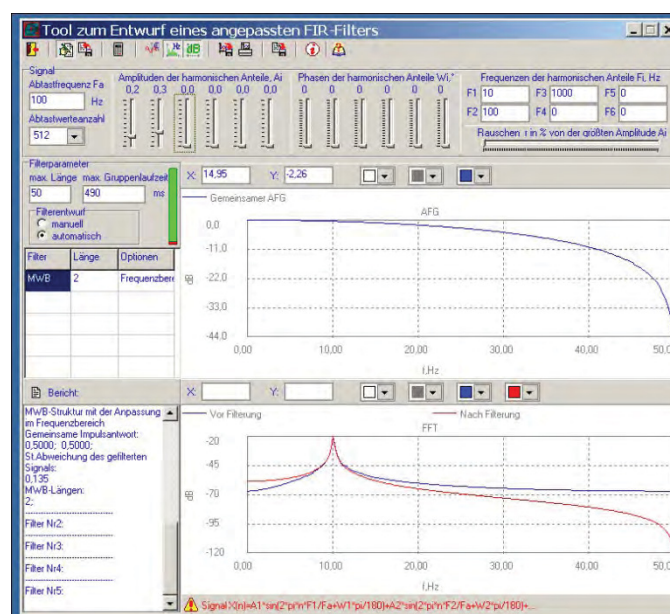


Abbildung 12: Tool zum Entwurf eines angepassten FIR-Filters

Ausnutzen von Zusatzsignalen bei dynamischen Waagen

Im praktischen Teil der Dissertation von Frau Dontsova wurde die Umsetzung der Filteralgorithmen an einer realen Waage gezeigt. Zur Triggerung der Zeitpunkte des Messanfangs und des Messendes werden Lichtschranken eingesetzt, die am Anfang und am Ende des Wägebendes angebracht sind. In der vorliegenden Arbeit wurde eine modifizierte Variante der Lichtschrankenordnung beschrieben, die die Möglichkeit vorsieht, die Gruppenlaufzeit des eingesetzten Filters an die verfügbare Messzeit anzupassen. Die praktische Umsetzung des Prinzips wurde gezeigt.

Experimenteller Vergleich zwischen klassischer Auswerteelektronik und adaptierter Multi-Signalauswertung

Um das Verhalten dynamischer Waagen mit digitalem Regler im Vergleich zu Analogreglern untersuchen zu können, wurden im Rahmen des Projektes zwei Einrichtungen zum Lastwechseln auf dynamische Waagen entwickelt. Mit den entwickelten Lastwechslern ist eine detaillierte Untersuchung des Reglerverhaltens sowohl für Analogregler als auch für Digitalregler unter reproduzierbaren Versuchsbedingungen möglich.

Eine nähere Beschreibung ist zu finden unter AP10: „Erforschung und Qualifizierung neuer Lastwechslerprinzipien für automatische Lastwechselvorrichtungen“.

AP3 – Schwingungsanalyse an Waagen und Waagenbauteilen

Insbesondere für dynamische Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation ist eine sehr genaue Kenntnis des Schwingungsverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Kenngrößen notwendig. Diese Kenngrößen sind beispielsweise die Masse auf der Waagschale, aber auch die Masse von Indifferenzgewichten am Hebel, sowie die Steifigkeit der Unterlage.

Berührungslose laserinterferometrische online Schwingungsanalyse an Waagenbauteilen

Im Zuge von Untersuchungen an OEM-Wägezellen für dynamische Messaufgaben wurde beobachtet, dass mechanische Resonanzen auf elastischen Unterlagen verstärkt wurden. Um diesen Effekt möglichst rückwirkungsfrei nachzuweisen wurde ein Laservibrometer über dem Koppelstück der Waage angebracht und die Schwingung für verschieden elastische Unterlagen gemessen (siehe Abbildung 13).

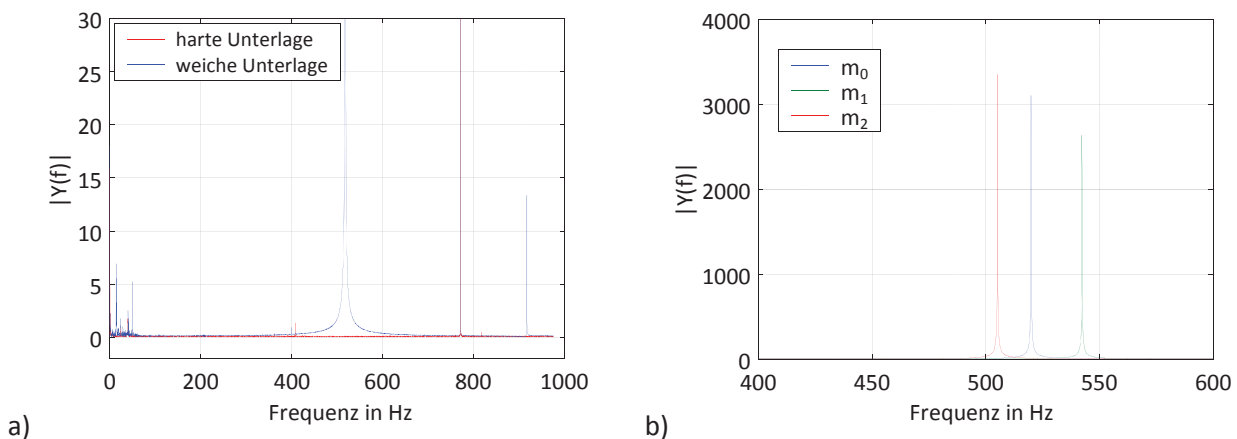


Abbildung 13: Exemplanische Darstellung der laserinterferometrischen Untersuchung von Resonanzeffekten:
a) Ausschnitt aus Frequenzbereich für verschiedene Unterlagen
b) Verschiebung der Resonanzfrequenz für verschiedene Massen auf der Waagschale ($m_1 < m_0 < m_2$)

Mit diesen Untersuchungen konnte rückwirkungsfrei nachgewiesen werden, dass die Frequenz der und die Amplitude der Resonanz eindeutig mit der Steifigkeit und der Masse auf der Waagschale korreliert sind. Auf Grund der konstruktiven Eigenschaften der untersuchten Waage war es nicht möglich, Beschleunigungen im Inneren der Mechanik zu erfassen. Allerdings besteht bei dem Einsatz digitaler Regelungen das Abtastsignal zu erfassen. Damit ist die Bewegung des Hebelendes der Waage bekannt welche nicht mit dem Vibrometer erfasst werden kann.

Um den Beitrag der Luft bezüglich der Dämpfung des Systems zu untersuchen, wurde die Waage bei verschiedenen Umgebungsdrücken betrieben. Hiermit konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass durch die relativ luftdichte Kapselung der Spule im Magneten kein signifikanter Beitrag zu dem dynamischen Verhalten der Waage geleistet wird (siehe Abbildung 14). Nicht nur bei diesen Untersuchungen war die Vakuumklimaprüfkammer von erheblichem Nutzen, welche dank der Finanzierung im Rahmen des InnoProfile-Projektes beschafft werden konnte.

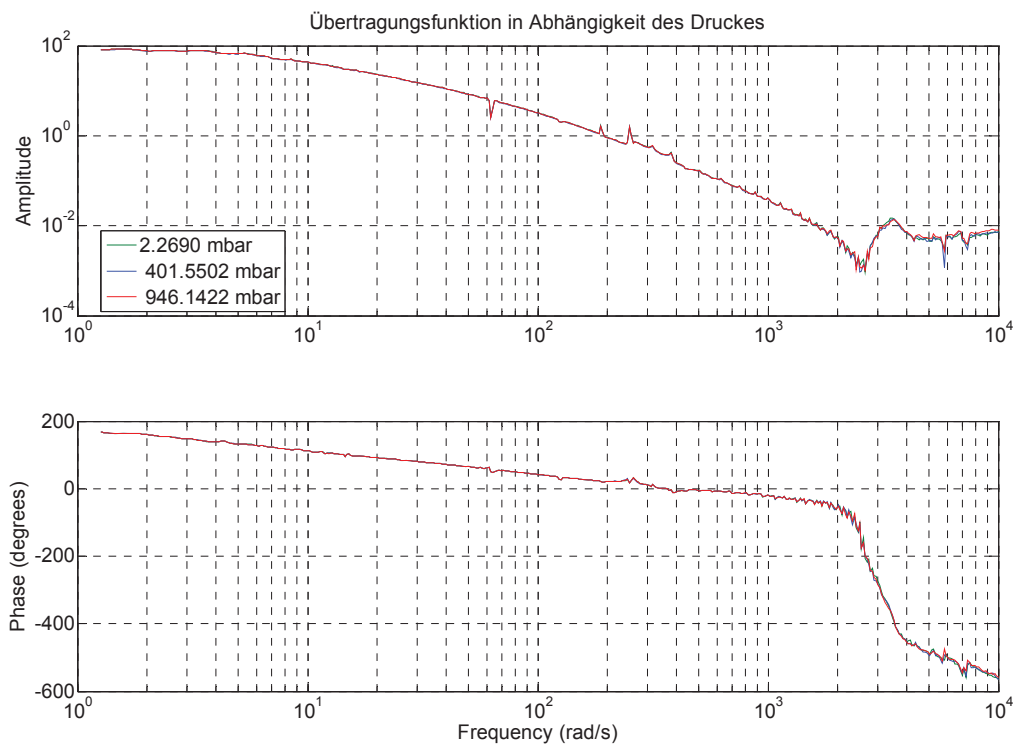


Abbildung 14: Übertragungsfunktion in Abhängigkeit des Umgebungsdruckes

Experimentelle Untersuchungen an EMK-Systemen im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass die Eigendämpfung der Wägesysteme durch Wirbelströme im enthaltenen Magnetsystem verursacht wird, was anhand von Abbildung 15 deutlich wird. Mit diesen Untersuchungen ist eine eindeutige Trennung und Definition der Dämpfungsanteile möglich. Diese Trennung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine nachfolgende Simulation sowie die Dimensionierung eines entsprechenden Reglers.

Hinsichtlich der Reglerdimensionierung muss zunächst eine Systemidentifikation erfolgen. Mit dem Lorentzkraftlastwechsler aus AP9 ist es in diesem Zusammenhang erstmals möglich, deterministisch Kräfte auf die Waagschale aufzubringen. In Verbindung mit einer zeitsynchronen Erfassung der Waagenanzeige können somit Übertragungsfunktion von Wägesystemen direkt ermittelt werden. Ein Vergleich mit herkömmlichen Anregungsmethoden durch Variation des EMK-Spulenstromes zeigt, dass über die Waagschale ein erweitertes Frequenzspektrum angeregt werden kann (siehe Abbildung 16 bzw. Abbildung 17). Dieses Wissen ist für eine Reglerdimensionierung sowie für die Definition von Belastungszyklen eines Wägesystems von besonderem Interesse.

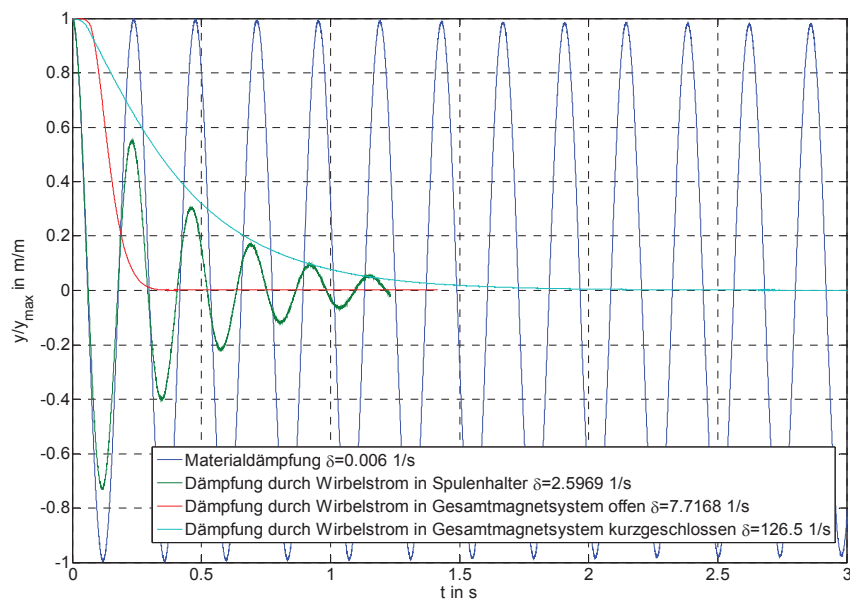


Abbildung 15: Dämpfung der Waage durch das interne Magnetsystem

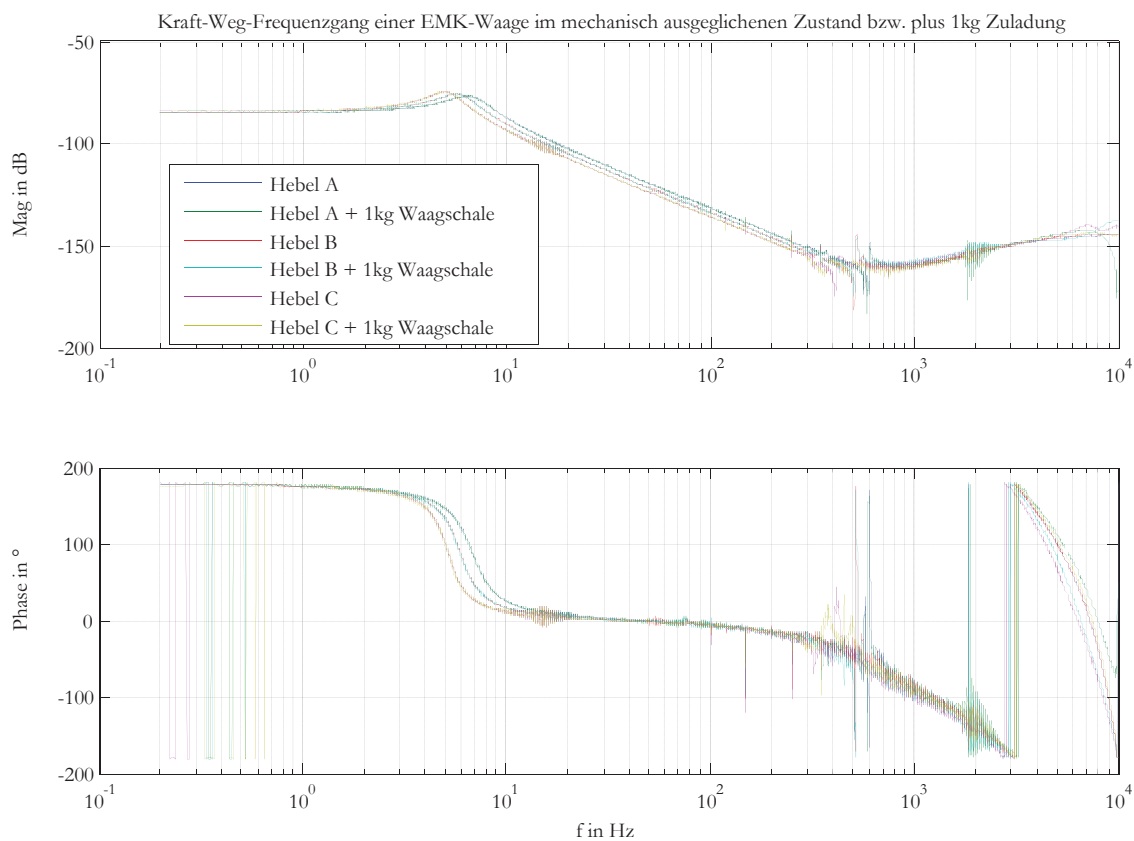


Abbildung 16: Systemidentifikation durch Variation des Stromflusses durch die interne Spule

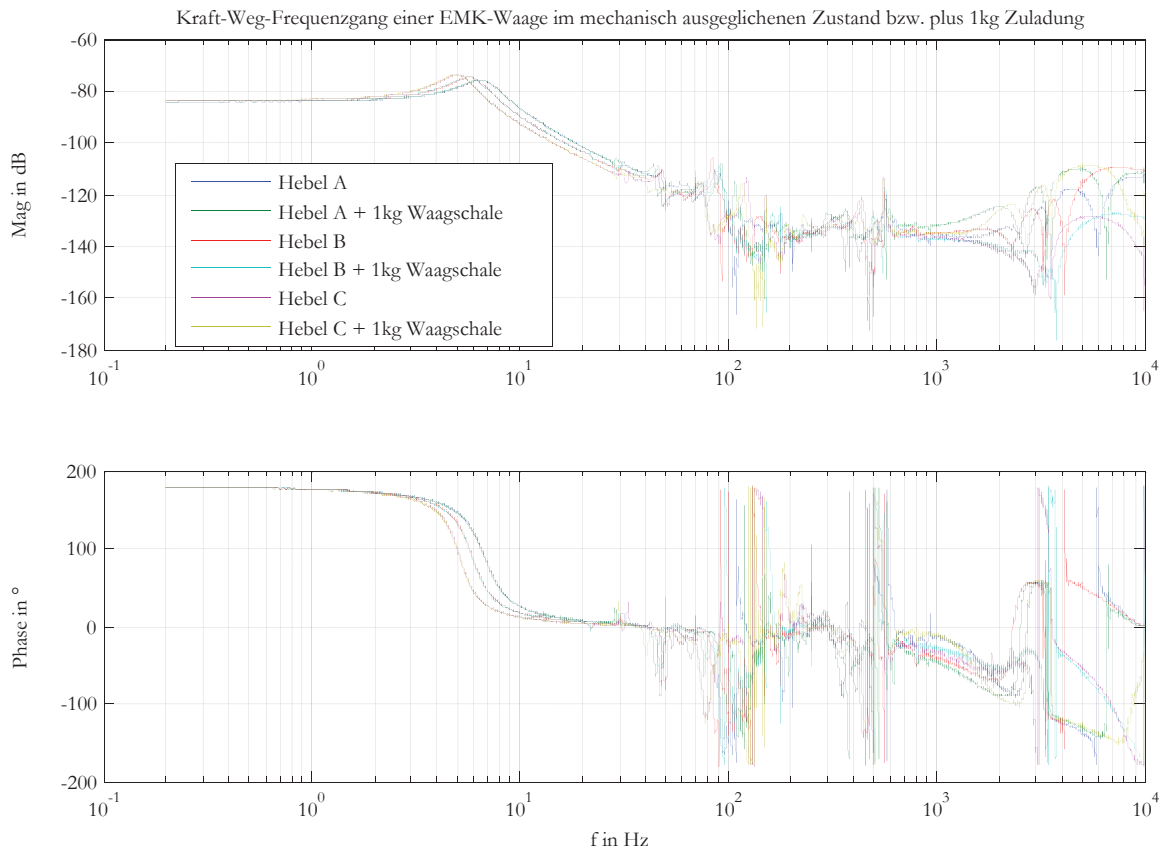


Abbildung 17: Systemidentifikation durch eine Erregung an der Waagschale

Vergleich mit numerischen Simulationen

Um die Veränderung von Eigenfrequenzen und -formen besser analysieren zu können, wurde basierend auf dem FEM-Modell aus AP4 eine Modalanalyse durchgeführt. Um diese Ergebnisse verifizieren zu können, wurden sie mit den Ergebnissen einer experimentellen Modalanalyse verglichen. Hierfür wurde die Waage mit einem elektrodynamischen Shaker erregt. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung (Tabelle 2):

Messung	Simulation		
E in Hz	E_{\min} in Hz	E_{normal} in Hz	E_{\max} in Hz
2,82	1,74	2,41	2,95
322,0	294,1	301,0	304,1
465,0	466,8	467,1	467,2
522,5	490,7	512,1	519,5
857,5	845,5	851,4	857,3
1060	972,0	1023	1052
1682	1669	1669	1670
1753	1704	1723	1733

Tabelle 2: Vergleich der Eigenfrequenzen E zwischen experimenteller und numerischer Modalanalyse

Im Folgenden wurde die Federkonstante der Unterlage in dem FEM-Modell verändert und die anschwingenden Moden aufgezeichnet. Für die folgende Darstellung wurden nur die Frequenzen aufgezeichnet, welche in dem signifikanten Frequenzbereich lagen. Mit der Erhöhung der Federkonstante der Unterlage erhöhte sich nicht nur die Frequenz der anschwingenden Moden, sondern auch die Eigenform veränderte sich. In den nachfolgenden Darstellungen wurden ineinander übergehende Eigenformen farblich markiert.

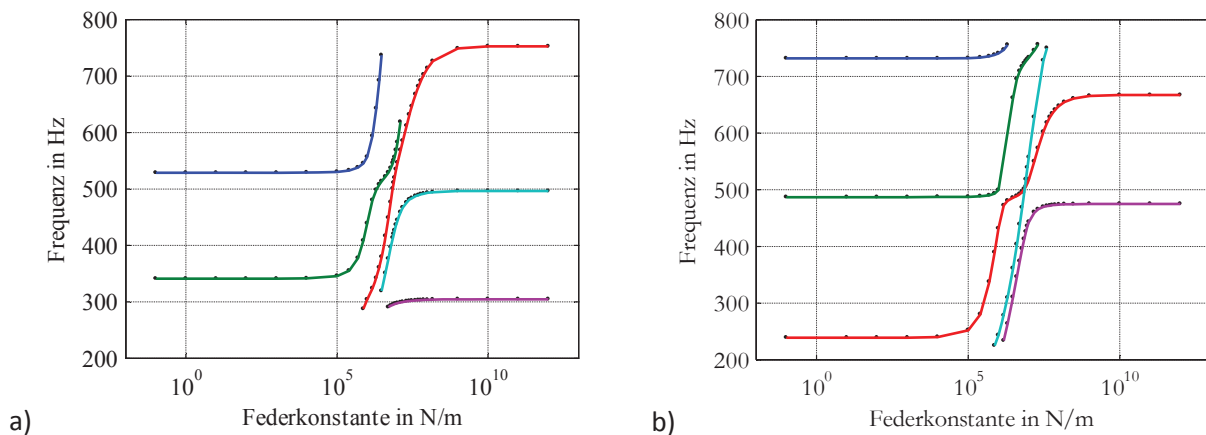


Abbildung 18: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Federkonstanten der Unterlage und der aufgelegten Masse: a) Verschiebung der Frequenzen bei 0 g Zuladung in Abhängigkeit der Federkonstanten, b) Verschiebung der Frequenzen bei 200 g Zuladung in Abhängigkeit der Federkonstanten

Weitere Vergleiche zwischen Simulation und Messung bezüglich des dynamischen Verhaltens der untersuchten Waagen werden in AP4 präsentiert.

AP4 – Untersuchung dynamischer Waagen

Wie bereits beleuchtet handelt es sich bei Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation um sehr komplexe mechatronische Gebilde. Die Optimierung eines solch komplexen Systems setzt voraus, dass eine gut zutreffende Modellvorstellung vorhanden ist. Zur Modellierung können verschiedene Ansätze gewählt werden: Analytische Modelle sind vollständig parametrisierbar, verlangen allerdings zumeist auch nach einem hohen Abstraktionsgrad, womit nur eine recht grobe Beschreibung des Systems möglich ist. Starrkörpermodelle zeichnen sich ebenfalls durch eine recht gute Parametrierbarkeit aus, hiermit kann bei relativ geringem Rechenaufwand eine recht hohe Modellierungstiefe erreicht werden. Lediglich mechanische Moden höherer Ordnung können nicht abgebildet werden, hierzu werden FEM-Modelle benötigt. Diese zeichnen sich durch eine exzellente Abbildung von Details des Systemverhaltens aus, ziehen damit aber große Rechenzeiten und eine (zum aktuellen Stand der Forschung) schlechte Parametrierbarkeit nach sich. Im Rahmen des InnoProfile Projektes wurden umfassende Starrkörper- und FEM-Modelle für EMK-Waagen erarbeitet.

Numerische Simulation verschiedener mechanischer Aufbauten mittels Starrkörpersimulation und mittels FEM und Vergleich der Ergebnisse

Die Mechanik der Waage wurde mittels eines Starrkörpermodells bzw. eines FEM-Modells abgebildet. Diese Modelle wurden jeweils noch durch Modelle für den Lageindikator, den Regler und den Spulenantrieb ergänzt (siehe Abbildung 19). Damit ist die Abbildung des kompletten Regelkreises möglich und darauf basierend eine geschlossene Optimierung aller Systemkomponenten.

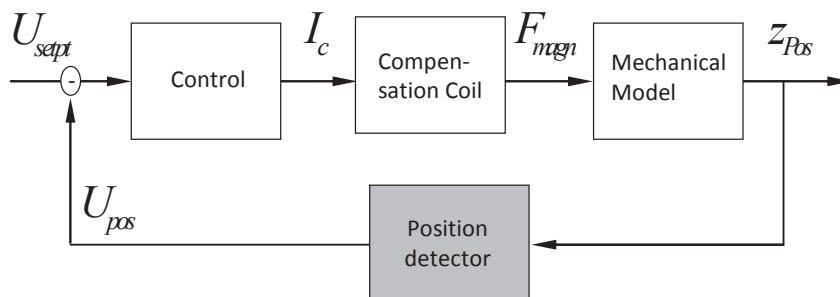


Abbildung 19: Modellbildung des geschlossenen Regelkreises für Starrkörper- und FEM-Modell

Starrkörper-Modell:

Starrkörpermodelle bestehen aus einzelnen Körpern die über Gelenke miteinander gekoppelt werden. Diesen Gelenken können Federsteifigkeiten und Dämpfungen zugeordnet werden.

Der Federanteil entsteht im Wesentlichen durch Einkörpergelenke, die als Torsionsfedern beschrieben werden können. Ihre Federkonstanten lassen sich wie in [4] beschrieben berechnen. In diesem Fall wurde zur Reduktion der Freiheitsgrade davon ausgegangen, dass die Federgelenke selbst nur über einen Freiheitsgrad verfügen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Federgelenke um ihre Hauptrotationsachse sehr nachgiebig sind, während sie für alle weiteren Freiheitsgrade sehr steif sind, so dass eine Federwirkung vernachlässigt werden kann.

Bei einem Starrkörpermodell wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Körper ideal steif sind. Hierbei handelt es sich um eine Vereinfachung, die nicht auf alle Teile einer EMK-Waage anwendbar sind. Bei dem Koppelstück kann auf Grund der kompakten Abmaße davon ausgegangen werden, dass die Körper tatsächlich steif sind. Die Parallelenker und der Hebel hingegen sind lang und schlank, unter Belastung ist eine Dehnung erkennbar. Sie können also nicht als starrer Körper angenommen werden. Die entstehende Dehnung unter Last kann gut durch Zugfedern beschrieben werden, denen Federkonstanten zugeordnet werden, die der Steifigkeit der jeweiligen Körper proportional sind. Die einzelnen Körper des Systems werden auf Massen, Massenträgheitsmomente, den Schwerpunkt des Körpers und Kontaktpunkte reduziert. Die Massenträgheitsmatrix wird um den jeweiligen Schwerpunkt herum angegeben. Das mechanische System wird hierzu in den Gelenken aufgetrennt, aus den resultierenden, einfachen Geometrien können die benötigten Daten leicht bestimmt werden. In Abbildung 20 ist eine schematische Darstellung des Aufbaus des Starrkörpermodells zu sehen.

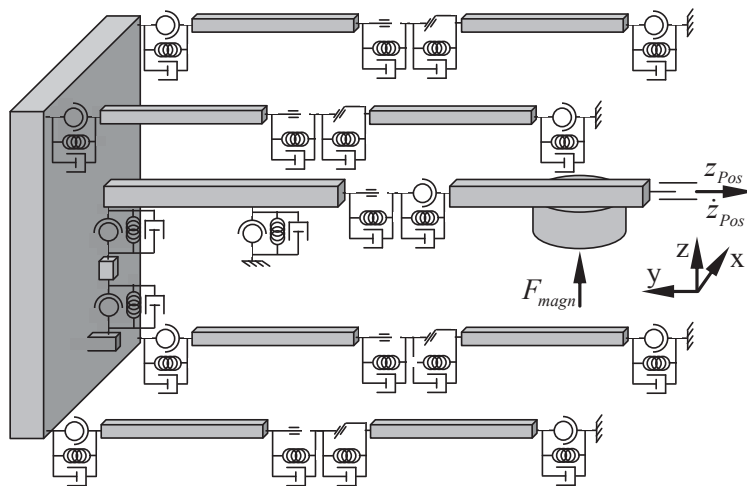


Abbildung 20: Schematischer Aufbau des Starrkörpermodells einer EMK-Waage

Die Modellierung der Dämpfung gestaltet sich etwas komplexer, da sich diese aus drei Teilen zusammensetzt: Der Dämpfung durch das Magnetsystem, der Dämpfung durch Reibung im Material und der Dämpfung durch Luft. Die Dämpfung durch Selbstinduktion in der bewegten Spule wird im analytischen Modell des Magnetsystems berücksichtigt und muss daher im Mehrkörperdynamikmodell nicht betrachtet werden. Die Dämpfung durch innere Reibung und durch Luft ist nur sehr schwer abzuschätzen, daher wird sie experimentell ermittelt und im Modell angepasst. Das System wird aus der Nulllage ausgelenkt und schwingt aus. Aus dem Abklingvorgang lässt sich die Dämpfung durch Luft und innere Reibung ermitteln. Beide Effekte sind so gering, dass sie ohne große Fehler zu einem Effekt zusammengefasst und der Dämpfung der Gelenke zugeschlagen werden können. Zusätzlich zu der Dämpfung durch Luft und durch innere Reibung kommt noch die Dämpfung durch Wirbelströme: Die Kapsel der Spule ist aus Aluminium gefertigt. Durch die Bewegung dieser Kapsel in dem B-Feld des Magneten werden darin Wirbelströme erzeugt, eine starke Bremswirkung kann beobachtet werden. Da diese Bremswirkung geschwindigkeitsproportional und lokal konzentriert wirkt, kann sie durch ein einzelnes geschwindigkeitsproportionales Dämpfungselement abgebildet werden, welches im Zentrum der Spule angreift [5].

FEM-Modell:

Die Mechanik der untersuchten Wägezellen ist monolithisch aufgebaut. Die Gelenke werden hierbei als Einkörpergelenke mit wenigen 10µm Dicke ausgeführt. Für diese Bereiche mit extremen Aspektverhältnissen wurde ein sogenanntes „Mapped-Mesh“ mit hoher Elementdichte gewählt, um die Steifigkeit dieser Federgelenke gut abzubilden und um numerische Spannungsspitzen zu vermeiden (siehe Abbildung 21, oben rechts).

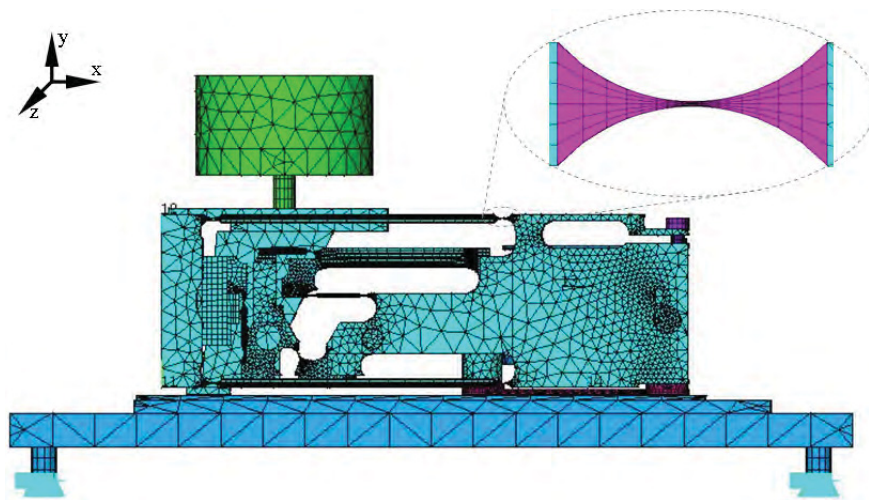


Abbildung 21: FEM-Modell der Waagenmechanik – oben rechts: vergrößerte Abbildung eines Einkörpergelenks

Um Umwelteinflüsse wie Grundvibrationen untersuchen zu können, wurde nicht nur der bewegliche Teil der Waage abgebildet, sondern ebenfalls die gestellfesten Teile und die Unterlage zur Befestigung. Die Steifigkeit ist wie bereits erläutert ebenfalls von großer Bedeutung für das dynamische Verhalten der Wägezelle. Aus diesem Grund wurde die Unterlage durch ein Feder-Dämpfer-Element (COMBIN14) modelliert, welchem verschiedenste Feder- und Dämpfungscharakteristika zugeordnet werden können.

Untersuchungen im Rahmen des Projektes an verschiedenen Chargen einer bestimmten Wägezelle haben gezeigt, dass Material- und Fertigungstoleranzen einen sehr großen Einfluss auf die Federsteifigkeit der Einkörpergelenke haben. Eine Abschätzung anhand der zulässigen Fertigungstoleranzen und Materialschwankungen hat eine maximale Abweichung der Federkonstanten vom Nominalwert von $\pm 30\%$ für die sensitive Richtung ergeben. Um diese Abweichungen in dem FEM-Modell zu berücksichtigen ohne die Geometrie der Federgelenke ändern zu müssen, wurde für jedes Federgelenk ein eigener E-Modul vereinbart und diesem E-Modul die Abweichung der Federkonstanten von der Nominalfederkonstanten zugeschlagen. Damit ist eine Abschätzung des Einflusses der Federkonstante auf das Systemverhalten möglich, ohne die Geometrie der Einkörpergelenke ändern zu müssen.

Die Dämpfung wurde analog zu der Dämpfung in dem Starrkörpermodell definiert [6].

Die nicht-mechanischen Teile wurden als Kennlinien bzw. Übertragungsfunktionen modelliert. Hierbei wurde für das Starrkörpermodell und das FEM-Modell jeweils das gleiche Modell verwendet, jedoch für das FEM-Modell wurden alle Übertragungsfunktionen und Kennlinien zusammengefasst und in ein APDL-Script (ANSYS Parametric Design Language) implementiert.

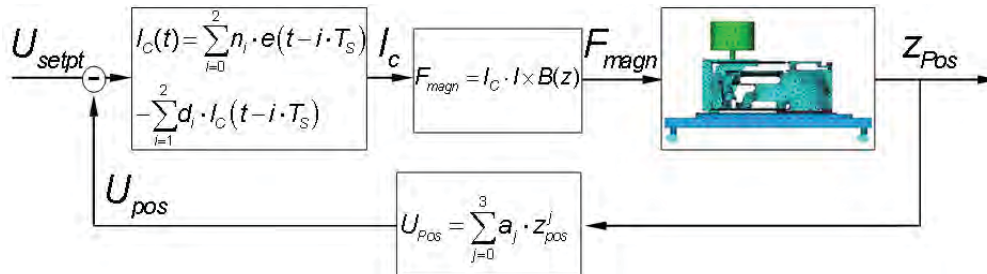


Abbildung 22: APDL-Loop zur Implementierung nicht-mechanischer Komponenten und Regler in FEM-Modell

Lageindikator:

Das Verhalten des Lageindikators wurde als Kennlinie implementiert. Diese Kennlinie wurde wie in AP5 beschrieben ermittelt. Das zeitliche Verhalten der Abtastschaltung kann gegenüber den übrigen Zeitkonstanten der Waage vernachlässigt werden.

Regler:

Hier wurde der PIDT1-Algorithmus implementiert, der bereits in AP1 vorgestellt wurde.

Spulenantrieb:

Der elektrodynamische Antrieb besteht aus zwei Teilen: der Dauermagnet ist fest mit dem Systemträger verbunden (wie in Abb. 1 zu sehen), die Spule ist mit dem Hebel verbunden und bewegt sich in dem Magnetfeld des Dauermagneten. Das Magnetfeld wurde vermessen und kann mit einer parabolischen Funktion angenähert werden.

Das Magnetsystem bringt durch den Strom, den der Regler vorgibt, die nötige Gegenkraft auf um die Waage in der Nulllage zu halten. Die wirkende Lorentzkraft wird mit (1) beschrieben.

$$F_{magn} = I_C \cdot l \times B = I_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{coil} \times B \quad (1)$$

Durch die Bewegung im Magnetfeld wird eine Spannung in der Spule induziert (2),

$$U_{ind} = -z_{Pos} \cdot s \cdot l \times B \quad (2)$$

sie bewirkt eine Rückkopplung zwischen mechanischem Verhalten und elektrischem Verhalten der Spule. Das Verhalten der Spule kann durch ihren ohmschen Widerstand und ihre Impedanz beschrieben werden.

Simulationsergebnisse:

Für das Starrkörpermodell kann für den niedrigen Frequenzbereich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung abgelesen werden (Abbildung 23). Zur Überprüfung des Zusammenspiels der Komponenten einer Waage und für erste Reglerdimensionierungen eignet sich dieses Modell sehr gut. Für den höheren Frequenzbereich treten Hebelresonanzen auf, welche durch diese Modellform nicht abgebildet werden können.

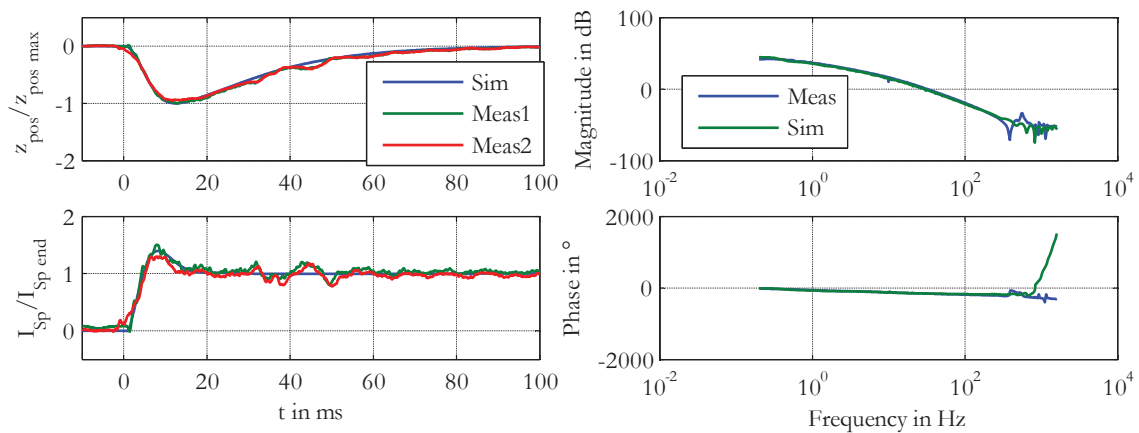


Abbildung 23: Vergleich von Simulation und Messung eines Lastwechsels auf die Waagschale (links) und Simulation und Messung des Amplitudenfrequenzganges der Waage für das Starrkörpermodell

Die Experimente zur Validierung wurden für das FEM-Modell wiederholt. Auch zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Modells für den niederfrequenten Bereich, aber auch die Hebelresonanz des Systems kann sehr gut abgebildet werden (siehe Abbildung 24, rechts).

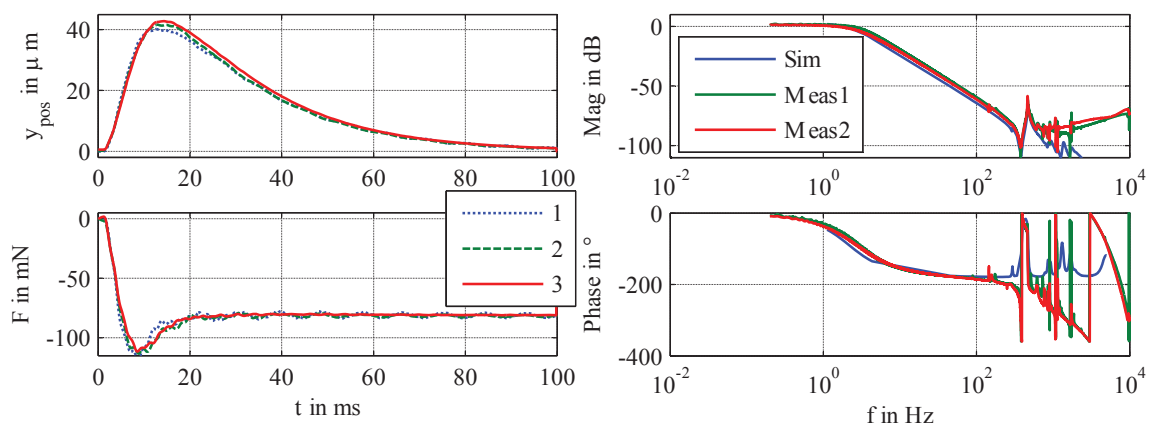


Abbildung 24: Vergleich von Simulation und Messung eines Lastwechsels auf die Waagschale (links) und Simulation und Messung des Amplitudenfrequenzganges der Waage für das FEM-Modell

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit beiden Modellen sehr gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung erzielt werden können. Bei dem FEM-Modell wird der sehr hohe Detaillierungsgrad bis hin zu sehr hohen Frequenzen mit einem großen Rechenaufwand erkauft.

Untersuchung prinzipieller Möglichkeiten zur Unterdrückung von Schwingungsformen und zur mechanischen Reduktion der Schwingungsfreiheitsgrade

Die Untersuchungen der Waage in den Arbeitspunkten AP3 und AP4 haben gezeigt, dass die auftretende Hebelresonanz das Schwingungsverhalten der Waage dramatisch beeinflusst. In dem vorliegenden FEM-Modell wurden einige konstruktive Änderungen vorgenommen, um das Auftreten dieser Eigenmode besser unterdrücken zu können. Hierzu wurde der Hebel versteift, ohne signifikant dessen Eigenmasse zu erhöhen. Damit konnte die störende Eigenresonanz in der Modalanalyse von 630 Hz auf 890 Hz verschoben werden (Abbildung 25), des Weiteren konnte die Eigenform soweit abgeändert werden, dass an der Waagschale und der Abtastung die Schwingungsamplitude dramatisch reduziert werden konnte.

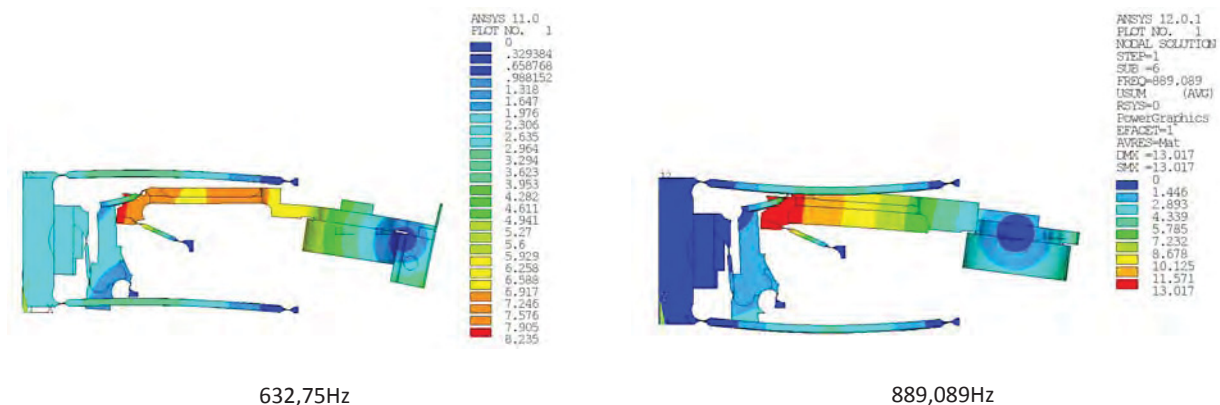


Abbildung 25: Veränderung der störenden Eigenmode durch geometrische Veränderungen

Im Zuge der Untersuchungen wurde zudem deutlich, dass die erste Eigenfrequenz der untersuchten Waagen nahezu unabhängig von der Masse auf der Waagschale ist. Das resultiert daraus, dass die untersuchten Waagen durchweg recht stark gedämpft sind und zudem über ein sehr großes Hebelverhältnis verfügen. Um die dynamischen Eigenschaften grundlegend zu verbessern empfehlen sich ein steifer Aufbau und eine geringe Hebelübersetzung. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Massen an den langen Hebeln gering gehalten werden.

Sind diesen konstruktiven Möglichkeiten ausgeschöpft, kann durch intelligente Reglerkonzepte die speziell auf die aktuelle Anwendung zugeschnitten sind ebenfalls noch eine Verbesserung des mechanischen Verhaltens erzielt werden. Einige dieser Reglerkonzepte wurden bereits im Rahmen dieses Projektes untersucht, siehe AP1.

AP5 – Verbesserung des Nulllageindikators in EMK-Waagen

Die Wegauflösung und die Langzeitstabilität des Nulllageindikators beeinflussen die messtechnischen Eigenschaften einer EMK-Waage in entscheidendem Maße, da Abweichungen in der Positionsbestimmung des Übersetzungshebels zu unerwünschten Rückstellkräften führen. Der resultierende Fehlereinfluss ist in Abbildung 26 dargestellt.

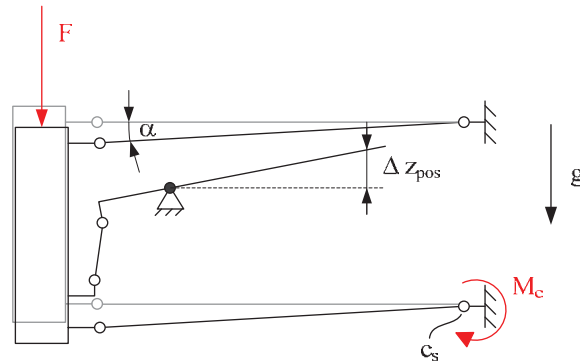


Abbildung 26: Einfluss einer Abweichung der Nulllage

Eine Abweichung der Nulllage führt zu einer Auslenkung des Koppelstückes und des Parallel-lenkersystems. Da sämtliche Gelenke der Waage als Einkörpergelenke ausgeführt sind, die eine gewisse Federsteifigkeit besitzen, führt ein Auslenken des Systems zwangsläufig zu einem Rückstellmoment, welches der Messkraft entgegen wirkt.

Die Anforderung an die Unsicherheit des Nulllageindikators ist abhängig von der Waage und deren Auflösung bzw. Messbereich und liegt in der Größenordnung von wenigen Nanometern (bei hochauflösenden Analysen-, Mikro- und Ultramikrowaagen, sowie Massekomparatoren) bis hin zu wenigen hundert Nanometern (bei Präzisionswaagen).

Vergleich möglicher neuer Prinzipien

Stand der Technik

Kommerziell verwendete Nulllageindikatoren in EMK-Waagen arbeiten nach einem optischen Prinzip.

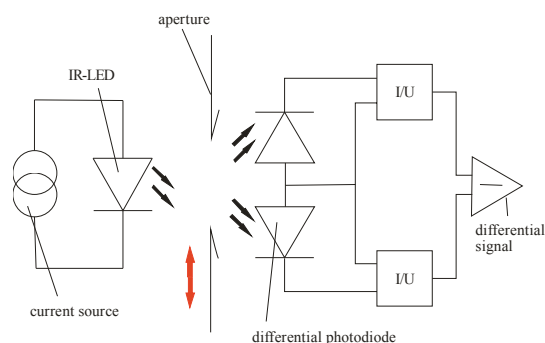


Abbildung 27: Funktionsprinzip eines klassischen optischen Nulllageindikators

Es leuchtet eine Infrarot-LED durch eine Blende auf eine Doppelfotodiode. Die LED und die Doppelfotodiode sind einem Halter befestigt und somit gestellfest. Die Blende ist ein Teil des Übersetzungshebels und somit beweglich gelagert. Die Doppelfotodiode besteht aus zwei Fotodioden, welche senkrecht zur Bewegungsrichtung der Blende ausgerichtet sind. Ändert sich nun die Position der Blende, so ändert sich auch die Beleuchtung auf der Doppelfotodiode und es wird eine Fotodiode mehr und die andere entsprechend weniger stark beleuchtet. Das Ausgangssignal der einzelnen Fotodioden wird zur Differenz gebracht. Das Differenzsignal ist damit proportional der Position der Blende und somit auch zur Position des Übersetzungshebels. In Abbildung 28 ist ein solcher Nulllageindikator, verbaut an einem Wägesystem sowie ein Nulllageindikator ohne Doppelfotodiode zur Sichtbarkeit der Blende dargestellt.

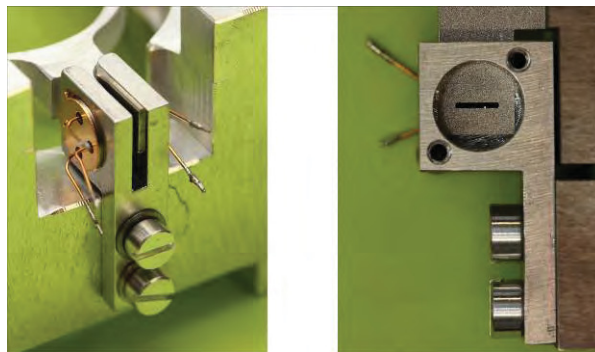


Abbildung 28: Praktische Umsetzung eines optischen Nulllageindikators

Basierend auf dem Stand der Technik wurden diverse Detailverbesserungen bzw. Untersuchungen vorgenommen.

Untersuchung verschiedener LEDs

Der Markt bietet eine Fülle von verschiedenen Infrarot-LED, die für den Lageindikator in Frage kommen, da sie in Bezug auf Bauform, elektrische Anschlüsse und Handhabung ähnlich der bisher verwendeten Modelle ist. Die LED unterscheiden sich in ihren messtechnischen Eigenschaften jedoch erheblich. In Zusammenarbeit mit dem CiS-Forschungszentrum, Erfurt und dessen AMOS-Projekt, sowie der Sartorius AG, Göttingen wurde eine Vorauswahl möglicher LED getroffen. Eine kleine Auswahl der untersuchten LED ist in Abbildung 29 zu sehen.

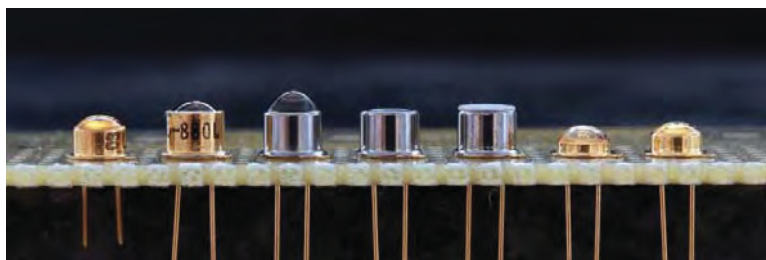


Abbildung 29: Verschiedene LED-Typen

Auswahl einer geeigneten Befestigungsmethode

Bei der Auswahl der geeigneten Befestigungsmethode ist vor allem die Halterung der LED und der Doppelfotodiode in dem Halter gemeint. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Klebern und verschiedene Prinzipien der Befestigung durch Klemmung.

Die Kleber unterscheiden sich durch ihre Zug- bzw. Scherfestigkeit, der Art ihrer Aushärtung (UV-Aushärtung, Temperatur, etc.) und vor allem durch ihre Beständigkeit gegenüber den Umwelteinflüssen. Ein großes Problem stellt das Quellen des Klebers unter dem Einfluss der Luftfeuchtigkeit dar, was sich letztendlich in einer Lageänderung der LED und/oder der Doppelfotodiode auswirken kann.

Entwicklung von Auswerteschaltungen

Ein weiterer Punkt war die Entwicklung von rauscharmen neuen Auswerteschaltungen für die Nulllageindikatoren. Die Auswerteschaltung wandelt das Primärsignal der Doppelfotodiode (Fotostrome) in eine Ausgangsspannung. Weiterhin wird der LED-Strom so geregelt, dass stets die gleiche Beleuchtungsstärke auf der Doppelfotodiode ist.

Das Ergebnis der Entwicklungsarbeit ist eine sogenannte Brückenschaltung, bei der die Fotostrome in einer Messbrücke direkt in eine Spannung gewandelt werden. Es entfallen somit mehrere elektrische Bauteile, die ein elektrisches Rauschen verursachen bzw. verstärken würden. Weiterhin wird die Doppelfotodiode nunmehr mit einer Vorspannung betrieben, was der Dynamik des Nulllageindikators zu Gute kommt.

Dual-LED Nulllageindikator

Der Dual-LED Nulllageindikator besteht aus zwei LEDs, die gemeinsam durch eine Blende auf eine Photodiode leuchten [7]. Die Photodiode empfängt somit die Signale beider LEDs. Die LEDs und die Photodiode sind einem Halter gestellfest gelagert, während die Blende beweglich ist. (Abbildung 30).

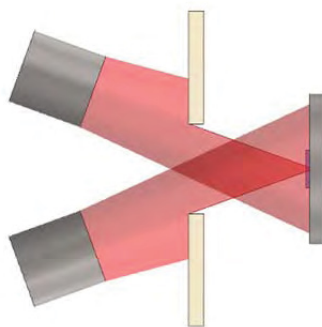


Abbildung 30: Prinzip Dual-LED Nulllageindikator

Je nach Position der Blende, empfängt die Photodiode mehr von der einen LED oder von der anderen. Um eine Trennung der Signale zu erreichen, werden die LEDs jeweils mit einem periodischen Signal gleicher Frequenz, aber unterschiedlicher Phase moduliert. Die Phasendifferenz ist idealerweise 180° . Das von der Photodiode empfangene Signal wird mittels eines Hochpasses gefiltert und demoduliert.

Eine anschließende Filterung mittels Tiefpassfilter ergibt das Ausgangssignal, welches proportional zur Position der Blende ist. Das Blockschaltbild ist in Abbildung 31 dargestellt.

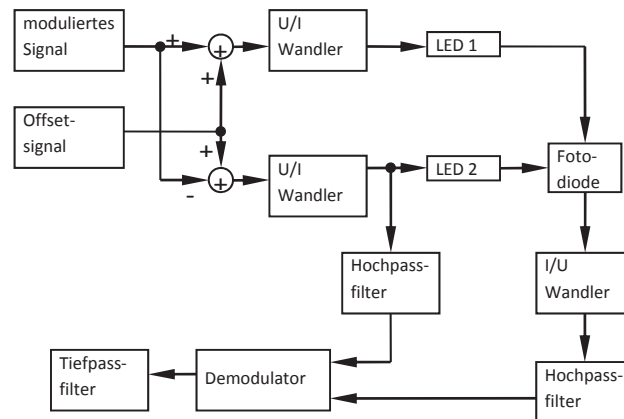


Abbildung 31: Blockschaltbild Schaltung Dual-LED Nullageindikator

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass durch die Modulation und anschließende Demodulation Fremdsignale sowie Streulicht unterdrückt werden. Weiterhin kann auf den Einsatz der kostenintensiven Doppelfotodiode verzichtet werden.

Kapazitiver Nullageindikator

Der kapazitive Nullageindikator ist als günstige Alternative zu dem optischen Prinzip geplant gewesen. Kapazitive Verfahren sind eine kostengünstige Methode um Abstände zu messen oder Nulllagen zu bestimmen. Nachteil der meisten Anordnungen ist, dass sich eine Änderung des Dielektrikums direkt auf das Positionssignal auswirkt. Dies ist ein Grund dafür, dass solche Lagesensoren meist nur eine geringe Auflösung besitzen und in low-cost Anwendungen verbaut werden.

Der kapazitive Nullageindikator der an unserem Institut entwickelt wurde, ist eine Differentialanordnung, das heißt, dass er prinzipiell aus zwei Kondensatoren besteht. Die äußeren, zueinander parallelen Platten sind gestellfest, während die gemeinsame mittlere Platte (ebenfalls parallel zu den äußeren Platten) beweglich ist (Abbildung 32).

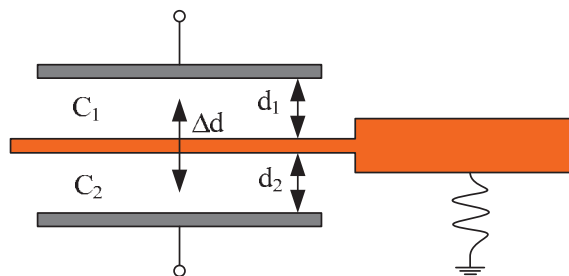


Abbildung 32: Prinzip kapazitiver Nullageindikator

Die einzelnen Kapazitäten sind umgekehrt proportional zum Abstand der Platten, d.h. es ist nichtlinear. Durch Differenzbildung der beiden Kapazitäten ergibt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit der Differenzkapazität zur Wegänderung:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = -2\varepsilon_0\varepsilon_r A \frac{\Delta d}{d_{1,2}^2 - (\Delta d)^2}$$

Der oben abgebildete kapazitive Nulllageindikator wird an einen Kapazität-zu-digital Schaltkreis von Analog Devices (AD7747) angeschlossen, der die beiden Kapazitäten zur Differenz bringt und über einen internen 24bit analog-digital-Wandler die Differenzkapazität digital ausgibt. Die Schaltung ist im Wesentlichen auf den kostengünstigen Schaltkreis minimiert und bedarf keiner weiteren Peripherie. In Hinblick auf eine digitale Regelung der Waage, ist ein digitaler Nulllageindikator sehr günstig.

Numerische Simulation verschiedener Prinzipien

Die numerischen Simulationen dienen der Verifizierung bzw. der Überprüfung der verschiedenen Prinzipien vor der praktischen Umsetzung. Diese Vorgehensweise spart Kosten und die Leistungsfähigkeit der alternativen Prinzipie kann bereits im Vorfeld grob abgeschätzt werden.

Als Simulationstools dient vor allem MATLAB Simulink, mit dem sich komplexe Modelle realisieren lassen. Grundlage der Simulationen ist das Strahlprofil der LED, die zuvor experimentell ermittelt werden müssen. Im Falle des kapazitiven Nulllageindikators sind keine speziellen Vorkenntnisse nötig. Mit Hilfe der geometrischen Abmessungen, welche in einer Simulation schnell geändert werden können, kann eine optimale Anordnung der verschiedenen Nulllageindikatoren ermittelt werden. Weiterhin lassen sich auch Schaltungskonzepte überprüfen, die vor allem bei der Entwicklung des Dual-LED-Nulllageindikators wichtig waren.

Aufbau eines Demonstrators

Zu allen bisher beschriebenen Varianten zur Nulllagedetektion wurden entsprechende Musteraufbauten zur Untersuchung der realen messtechnischen Eigenschaften und deren Verifizierung erstellt.

Ermittlung der messtechnischen Eigenschaften des Nulllageindikators als Wegsensor

Wie bereits weiter oben erwähnt ist das Ausgangssignal der Nulllageindikatoren proportional zur Blendenposition. Somit kann der Nulllageindikator auch als Wegsensor genutzt werden. Um die messtechnischen Eigenschaften erfassen zu können wurden im Zuge des Projektes mehrere Prüfeinrichtungen konzipiert und letztendlich erfolgreich aufgebaut. Zum einen ist es wichtig den Bezug des Ausgangssignals zum Weg zu ermitteln. Damit verbunden ist die Ermittlung der Auflösung, sowie der Linearität und Reproduzierbarkeit der Lageindikatoren. Mittels einer zweiten Prüfeinrichtung können die Einflüsse durch Variation der Umweltparameter ermittelt werden.

Ermittlung der Ausgangssignal-Weg-Kennlinie

Zur Ermittlung der Ausgangssignal-Weg-Kennlinie des Nulllageindikators wurde eine EMK-Waage derart umfunktioniert, dass mit Hilfe eines interferometrischen Längenmesssystems der Firma SIOS Meßtechnik GmbH die Position des Koppelstücks metrologisch rückführbar gemessen werden konnte. Damit konnte erstmals ein direkter Zusammenhang zwischen der Position des Koppelstücks und der Regelgröße hergestellt werden. Der entsprechende experimentelle Aufbau ist in Abbildung 33 dargestellt.

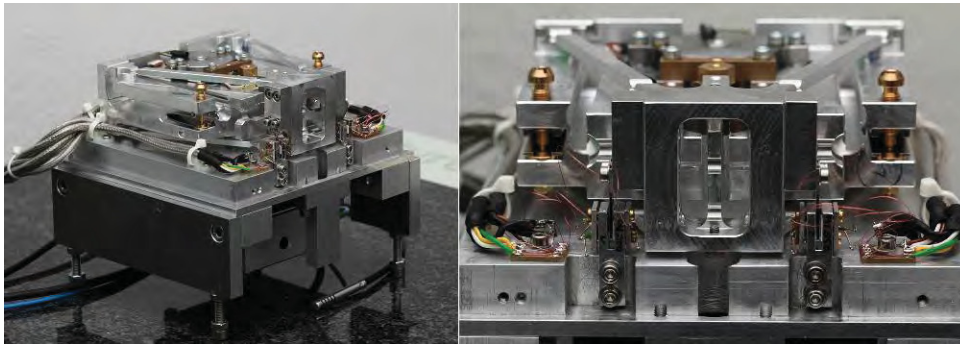


Abbildung 33: Experimenteller Aufbau zur Ermittlung der Ausgangssignal-Weg-Kennlinie

Mit Hilfe dieses Aufbaus war es möglich eine Optimierung der bisherigen Nulllageindikatoren vorzunehmen. Hierdurch konnte die Empfindlichkeit des Nulllageindikators um ein mehrfaches gesteigert werden. Die Maßnahmen beschränkten sich hierbei auf die Bestimmung der optimalen Kombination aus LED, -Blende und Doppelfotodioden.

Weiterhin konnte der Einfluss der Änderung des LED-Stromes auf das Lagesignal ermittelt werden: Eine Änderung des LED-Stromes führt zu einer Veränderung der Abstrahlcharakteristik der LED und damit zu einer virtuellen Änderung des Lagesignals. Dieser Umstand wirkt sich negativ auf die Reproduzierbarkeit des Nulllageindikators aus. Auch hier konnte ein Optimum gefunden werden. Mit diesem Experimentalaufbau konnten ebenso alternative Messprinzipie hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit, Auflösung und Reproduzierbarkeit untersucht werden.

Auf dem Grundkonzept dieser Anordnung ist weiterhin eine Vielzahl neuartiger Messmethoden denkbar, da neben der Wegkennlinie eine Kraftkennlinie simultan ermittelt werden kann. Dies würde beispielsweise eine Ermittlung der sehr geringen Federsteifigkeit der Messspitzen eines Rasterkraftmikroskops ermöglichen. Der Stand der Technik auf diesem Gebiet beschränkt sich derzeit auf die Kopplung eines Positioniersystems mit einem Kraftmesssystem um die Kraft-Weg-Kennlinien zu ermitteln [8].

Ermittlung der Umwelteinflüsse

Messgeräte und somit auch Waagen reagieren unterschiedlich stark auf sogenannte Quereinflüsse, die das Messergebnis negativ beeinflussen. Allen voran sind hier die Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchte zu nennen. Diese können als Temperaturkoeffizient bzw. Feuchtekoeffizient des Gerätes beschrieben werden. Untersuchungen der Sartorius AG, Göttingen haben gezeigt, dass ein wesentlicher Beitrag zum Temperaturkoeffizienten und vor allem dem Feuchtekoeffizienten vom Nulllageindikator her rührt. Um diese Einflüsse getrennt von der restlichen Waage ermitteln zu können, wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt und aufgebaut. Mit diesem Versuchsaufbau können simultan zehn verschiedene Nulllageindikatoren hinsichtlich ihres Verhaltens gegenüber Temperatur und Luftfeuchte untersucht werden. Die Untersuchungen finden in einer Klimakammer der Firma Weiss Umweltmesstechnik GmbH statt, die für dieses Projekt angeschafft wurde. Der große Vorteil dieser Klimakammer ist die unabhängige Regelung der drei wichtigsten Umweltparameter Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck. So können beispielsweise Versuche im Vakuum durchgeführt werden, um die Luftfeuchte komplett zu unterdrücken und nur den Einfluss der Temperatur zu ermitteln.

Es werden zehn Nulllageindikatoren gleichzeitig gemessen, um eine statistische Auswertung machen zu können. Der Versuchsaufbau selber besteht aus speziell angefertigten Verformungskörpern, die es ermöglichen den Nullpunkt der Nulllageindikatoren sehr feinfühlig einzustellen und weiterhin neben dem Nullpunkt auf die Empfindlichkeitseffekte zu ermitteln. Zur Ermittlung der Empfindlichkeit kann mittels eines Lastwechslers auf jeden einzelnen Verformungskörper jeweils eine definierte Masse aufgesetzt werden, die die Lage der Blende verschiebt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 34 zu sehen.

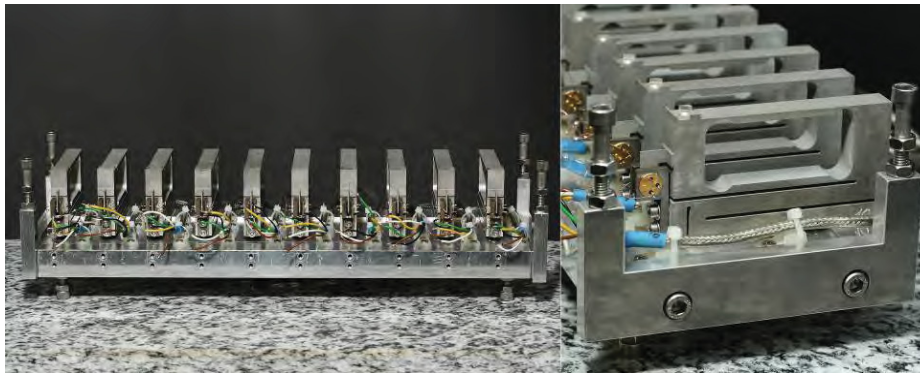


Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Umwelteinflüsse

Mit diesem Versuchsaufbau können die Temperaturkoeffizienten und Feuchtekoeffizienten verschiedener Nulllageindikatoren, die sich hinsichtlich der LED und/oder der Doppelfotodiode oder der Befestigung der einzelnen Bauteile unterscheiden. Weitere Parameter sind das Material der Schrauben zur Befestigung, sowie deren Anzugsmoment und das Material des Halters und der verwendete Klebstoff.

AP6 – Dynamische Kompensation von Temperatur- und Feuchteinflüssen bei DMS- und EMK-Waagen

Eine Teilaufgabe des Arbeitspaketes bestand in der Langzeituntersuchung zu Lufttemperatur- und Luftfeuchteschwankungen in geregelten und ungeregelten Messräumen um Zusammenhänge zwischen Änderungen des Umgebungsklimas und Klimaänderungen in den Laborräumen zu erkennen.

Auswahl geeigneter Temperatur- und Feuchtesensoren

Entsprechende Voruntersuchungen sind in der Dissertation von F. Hilbrunner [9] aufgeführt.

Gute metrologische Eigenschaften (geringe Messunsicherheit und ausreichende Auflösung) kombiniert mit einem günstigen Preis bieten die Sensoren SHT 75 der Firma Sensirion.

Diese Miniatursensoren verfügen gleichzeitig über ein digitales Interface. Mittels eines I²C-ähnlichen Protokolls können kalibrierte Klimawerte von den Sensoren abgefragt werden. Hierzu war es notwendig, eine geeignete Schnittstellenwandlung zwischen den Sensoren und dem PC zu entwickeln.

Anbindung an PC

1. Adapter an LPT-Port

In Vorbereitung der geplanten Langzeittemperatur- und Langzeitfeuchteuntersuchungen wurde in den Jahren 2006/2007 die Anbindung eines kalibrierten digitalen Miniatur- Temperatur- und Feuchtesensors an den PC mit der notwendigen Messsoftware realisiert. In der ersten Variante wurde hierbei als Schnittstelle der LPT-Port des PCs verwendet. Das I²C-Protokoll wurde hierbei „zu Fuß“ umgesetzt.

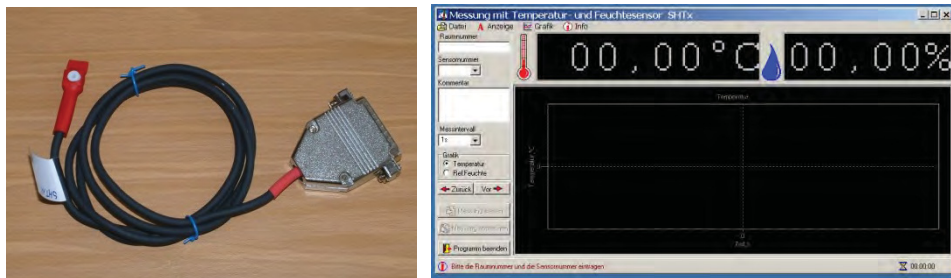


Abbildung 35: Links: Digitaler Temperatur- und Feuchtefühlers mit Adapter an LPT-Port, Rechts: Software zur Aufzeichnung der Klimadaten

Funktionsumfang:

- Entwicklung und Aufbau der Adapterelektronik zum Anschluss des Sensors an den LPT-Port des Rechners
- Erstellung verschiedener Programme zur Einbindung des Sensors in MatLab, in diverse Programme als „dynamic link library“ und als Standalone-Variante mit entsprechender Datenaufzeichnung wie in der rechten Abbildung dargestellt.

2. Adapter an USB Port

Die Variante des Betriebs der digitalen Klimafühler am LPT-Port hat entscheidende Nachteile:

- An modernen Rechnern ist „nativ“ keine LPT-Schnittstelle mehr vorhanden
- Die Kabellänge zum Betrieb des Fühlers ist begrenzt
- Die Zeit zum Übermitteln eines Messwertes ist aufgrund der rudimentären Protokollumsetzung hoch

Aus diesen Gründen wurde nach Varianten gesucht, um die Klimafühler an den USB-Port des Rechners zu adaptieren. Eine kostengünstige und einfach zu handelnde Variante stellt hierbei der sogenannte IO-Warrior der Firma Code Mercenaries dar. Mit Hilfe dieses Schnittstellenumsetzers können SPI- und I2C Bausteine direkt über USB angesprochen werden. Die USB-Schnittstelle wird hierbei über ein Human Interface Device (HID) umgesetzt, d.h. es sind keine zusätzlichen Treiber notwendig.

Zusätzlich zum kombinierten Temperatur- und Feuchtesensor wurde ein I²C-Luftdrucksensor der Firma Bosch (BMP085) implementiert. Somit können auf einfache Art und Weise die relevanten Klimagrößen gemeinsam erfasst und protokolliert werden. Der BMP085 gehört unter den kommerziell verfügbaren digitalen Drucksensoren zu denen mit der geringsten Messunsicherheit.

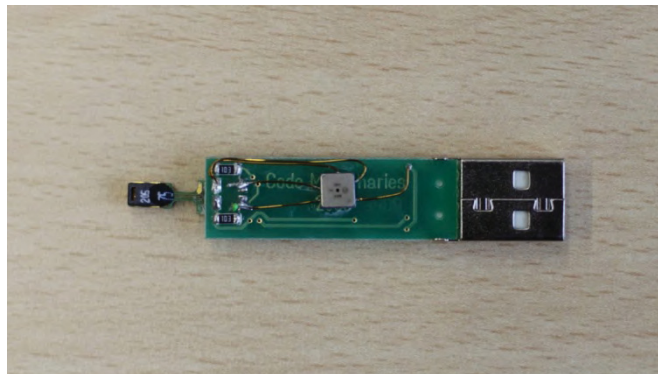


Abbildung 36: Experimentalaufbau IO-Warrior 24 mit SHT 75 und BMP085

Die Entwicklung auf dem Gebiet der digitalen Klimasensorik ist in den letzten Jahren schnell vorangeschritten. Aktuell werden von der Firma IST Klimasensoren der Typenreihe HYT-271 und HYT-221 angeboten. Diese haben gegenüber den Sensirion SHT 75 den Vorteil der geringeren Leistungsaufnahme. Leistungsaufnahme ist bei digitalen Sensoren insofern ein kritischer Parameter, da die umgesetzte Leistung zu einer deutlichen Eigenerwärmung der Sensoren führt und somit das Messergebnis verfälscht wird.

Komplettgerät Temperatur Luftfeuchte Luftdruck

Seit dem Jahr 2009 werden von der Firma WUNTRONIC Mess-, Steuer- und Regelgeräte GmbH verschiedene Messumformer für die Klimagrößen: Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck angeboten. Besonderheit dieser Sensoren ist das LAN-Interface. Mittels TCP/IP können die Klimawerte beispielsweise über das Internet geladen werden.



Abbildung 37: Wuntronic Klimasensor mit LAN Schnittstelle, Typ: T7510
(Quelle: <http://www.wuntronic.com>)

Im Mai 2010 wurden sechs Laborräume mit diesen Klimasensoren ausgestattet. Zur zentralen Messwerterfassung wurde eine spezielle Software entwickelt, die die Klimawerte der einzelnen Räume auf einem Novell-Server abspeichert. Somit können die Klimawerte und die Messwertdateien jederzeit abgerufen werden.

Ausstattung der Laborräume:

- K2008: keine Klimatisierung, Fenster auf Nordseite
- K2017: Klimatisierung, Fenster auf Ostseite
- K2019: teilweise Klimatisierung, Fenster auf Ostseite
- K2021: keine Klimatisierung, Fenster auf Ostseite
- APZ Masselabor: teilweise Klimatisierung, keine Fenster
- EAZ1212: teilweise Klimatisierung

Ein Nachteil der Sensoren T7510 ist die begrenzte Auflösung der Temperaturmessung von 0,1 K.

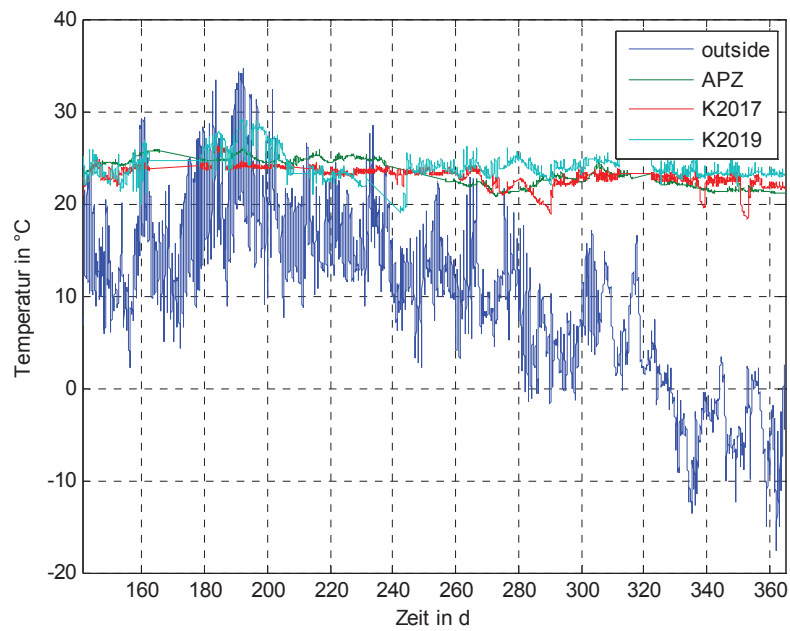
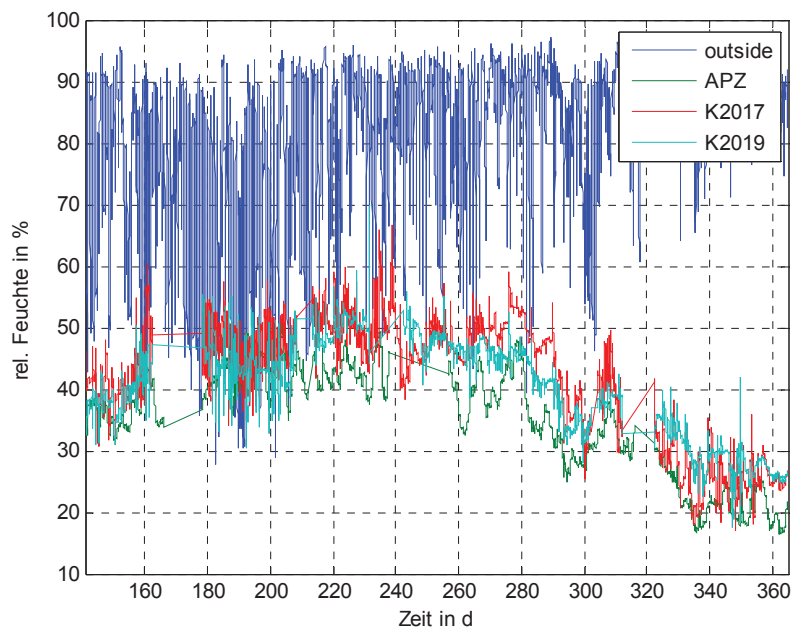
Zentrale Wetterstation der TU Ilmenau

Im Jahre 2005 wurde vom Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik der Fakultät Maschinenbau der TU Ilmenau eine Wetterstation zur Aufzeichnung der Umweltdaten installiert. Somit stehen neben den Temperatur-, Feuchte- und Luftdruckdaten verschiedener Laborräume auch die zugehörigen Daten des Umgebungsklimas zur Verfügung.

(Link: <http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwtd/WISI/WISI01.htm>)

Ergebnisse der Langzeituntersuchungen

Im Folgenden sind die Umgebungsklimadaten den Laborklimadaten auszugsweise gegenübergestellt. Die Datenreihen beginnen in der 2. Hälfte des Jahres 2010 und enden am 31.12.2010.

**Abbildung 38:** Zeitlicher Verlauf der Temperatur**Abbildung 39:** Zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte

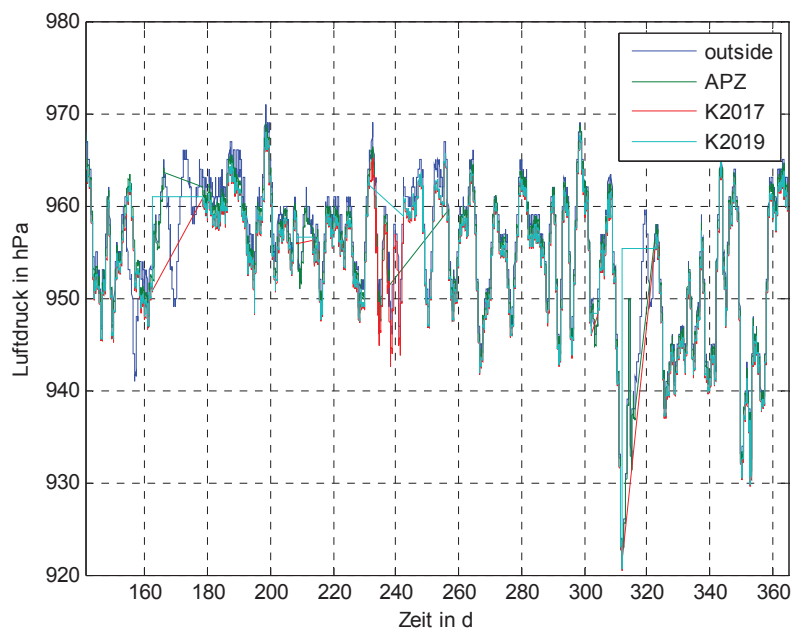


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks

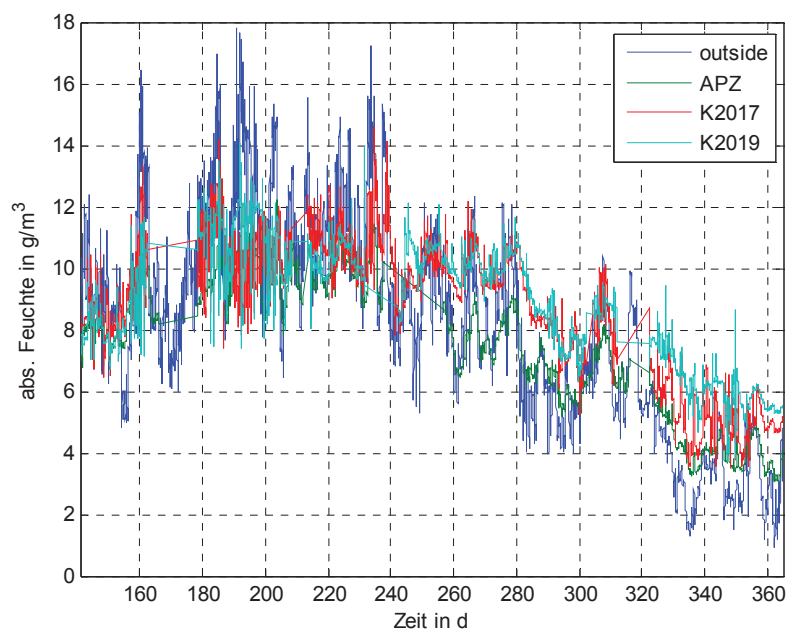


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte

Wie zu erwarten, gibt es zwischen dem zeitlichen Temperaturverlauf der Umgebung und der Laborräume nahezu keine Korrelation. Ebenso ist zwischen der relativen Luftfeuchte der Umgebung und der Laborräume kein Zusammenhang erkennbar.

Der Luftdruck hingegen verläuft bei allen Messstationen nahezu gleich. Unterschiede resultieren wahrscheinlich im Wesentlichen aus den unterschiedlichen Sensorkennlinien.

In Abbildung 41 sind die berechneten Verläufe der absoluten Luftfeuchte, aus der relativen Luftfeuchte und der jeweiligen Temperatur, dargestellt. Hierbei ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Konzentration der Umgebungsluft und der Laborräume erkennbar.

Untersuchung des Temperatur- und Feuchteverhaltens von Waagen

Der Hintergrund der Teilprojekte „Klimaerfassung“ sind störende Reaktionen der Wägesysteme auf Klimaänderungen. Neben der gewünschten Sensitivität auf die zu bestimmende Masse auf der Waagschale hängt die Waagenanzeige auch von den Störgrößen: Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck ab. Die Abhängigkeit vom Luftdruck ist hierbei im Wesentlichen durch luftdruckabhängige Auftriebskräfte zu erklären. Temperaturänderungen können vielfältige Wirkungen haben. Bekannte Effekte sind beispielsweise die thermische Längenänderung und die thermische Widerstandsänderung. Jedoch ist auch die Wasseraufnahme von Feststoffen von der Temperatur abhängig. Bei niedrigen Temperaturen könne Feststoffe mehr Wasser als bei hohen Temperaturen aufnehmen. Somit führen Temperaturänderungen zwangsläufig zu Beladungsänderungen. Hierbei ist die Trennung zwischen Temperatur- und Feuchteinfluss oftmals sehr schwierig. Um Licht in diese Problematik zu bekommen, wurden Untersuchungen in einer Vakuumklimaprüfkammer durchgeführt. Hierbei ist eine eindeutige Trennung zwischen Temperatur- und Feuchtwirkungen möglich.

In zahlreichen Untersuchungen konnte der optische Nulllageindikator von EMK-Waagen als ein besonders temperatur- und feuchtesensitives Bauteil identifiziert werden. Zur Klimaabhängigkeit der Nulllageindikatoren sind Angaben unter dem AP5 enthalten.

AP7 – Erdbeschleunigungsunabhängige Massebestimmung

Der Grundgedanke hinter diesem Arbeitspaket liegt in der Ausnutzung der Zusatzinformation „Schwingfrequenz“ bei der Massebestimmung mit Verformungskörperwaagen.

Klassische Waagen mit Verformungskörpern, bspw. DMS-Waagen, nutzen nur das statische Verformungssignal zur Berechnung der Waagenanzeige. Das resultiert vor allem aus der Tatsache, dass die „Masse“ in der Wägetechnik immer die „schwere Masse“ bezeichnet. Waagen messen also die Gewichtskraft, die eine Masse hervorruft.

Neben dieser schweren Masse kann man mit einer gewöhnlichen Verformungskörperwaage aber auch die träge Masse ermitteln. Diese Betrachtungsweise stellt jedoch zusätzliche Anforderungen an das Wägegut und an den Aufstellort. Es muss sichergestellt werden, dass sich zu jedem Zeitpunkt alle Teile des Wägegutes in der gleichen Phasenlage wie die Waagschale bewegen. Diese Forderung reduziert die Einsatzmöglichkeiten einer derartigen Applikation. Jedoch gibt es durchaus praktische Anwendungen, wo diese Anforderungen an das Wägegut im Rahmen der geforderten Messunsicherheit erfüllt werden.

Betrachtet man ein derartiges Wägesystem als ideales Feder-Masse-Dämpfungselement so gilt:

$$(m_0 + m)\ddot{x} - k\dot{x} - cx = 0$$

D.h., dass die zu ermittelnde Masse m das Schwingungsverhalten des Wägesystems beeinflusst. Mit zunehmender Masse reduziert sich die Eigenfrequenz des Systems.

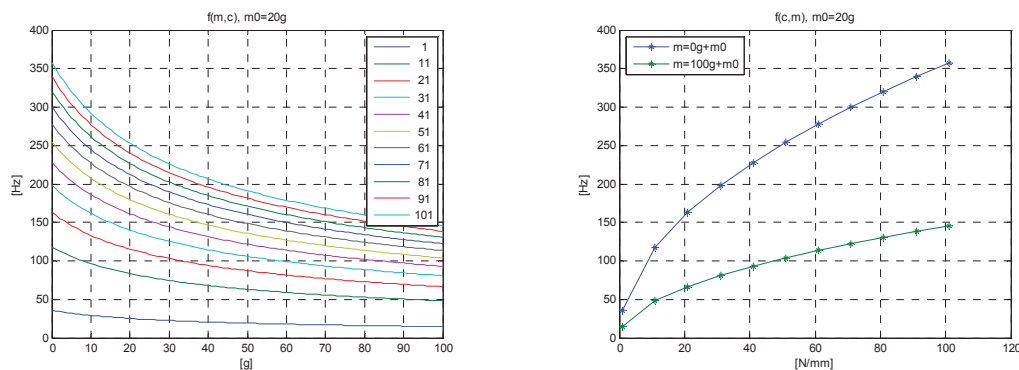


Abbildung 42: Simulierte Abhängigkeit der Eigenfrequenz von Masse und Federsteifigkeit, links: Parameter Federsteifigkeit in N/mm

Im Rahmen experimenteller Untersuchungen wurde ermittelt, wie reproduzierbar diese masseabhängige Eigenfrequenz ermittelt werden kann. Als Wägesystem kam ein kommerzielles DMS-Wägesystem mit einer Maximallast von 100 g und einer Auflösung von 1 mg zum Einsatz. Um reproduzierbare Verhältnisse zur Schwingungserregung zu bekommen, wurde das Wägesystem mit Hilfe eines zusätzlichen Elektromagneten an einen Anschlag gezogen und in einem festen Zeitregime durch Abschalten des Elektromagneten zum freien Schwingen angeregt.

Der Abklingvorgang wurde mit Hilfe eines optischen Lagesensors erfasst und mit einem Präzisionsmultimeter mit einer Samplefrequenz von 10 kHz aufgezeichnet. In Abbildung 43 ist beispielhaft ein derartiger Abklingvorgang dargestellt. 4000 Werte entsprechen hierbei einer Messzeit von 0,4 s.

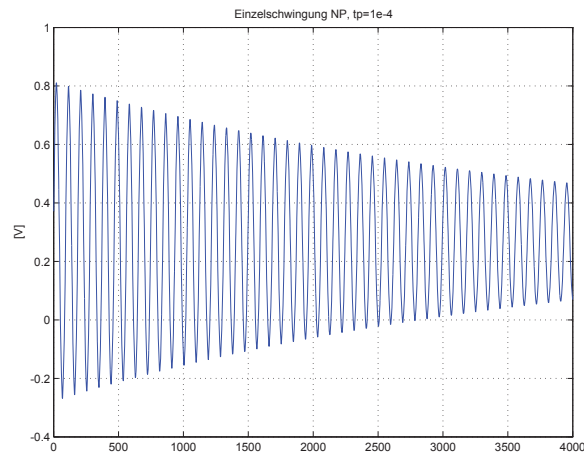


Abbildung 43: Abklingvorgang nach Lösen des Elektromagneten

Unter Zuhilfenahme eines speziellen Fitting-Algorithmus wurden aus diesem Abklingvorgang die Parameter der Schwingungsdifferentialgleichung ermittelt. In Abbildung 44 sind die so ermittelten Eigenfrequenzen für 100 aufeinanderfolgende Abklingvorgänge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Frequenz mit einer Auflösung von ca. 0,1 mHz mit diesem Algorithmus bestimmt werden kann.

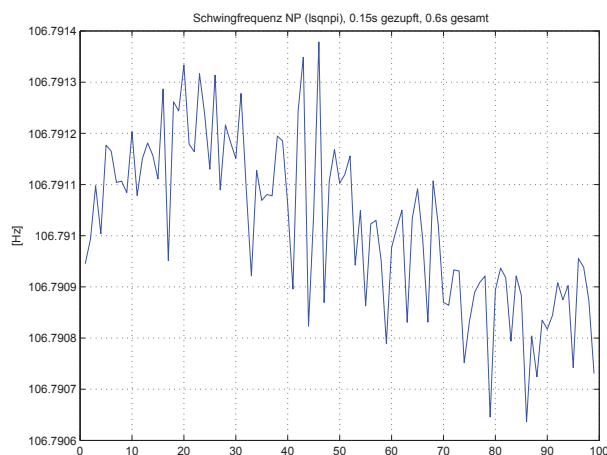


Abbildung 44: Aus 100 Abklingvorgängen ermittelte Schwingfrequenz

In Abbildung 45 sind die zu den Frequenzen aus Abbildung 44 zugehörigen Massen dargestellt. Hierbei ist die hohe Auflösung der Massebestimmung sichtbar. Aus einem Abklingvorgang mit einer Dauer von lediglich 0,4 s ist es möglich, die Masse mit einer Auflösung im Milligrammbereich zu ermitteln. Diese einfachen Grundlagenuntersuchungen verdeutlichen das hohe Potenzial des Verfahrens für ausgewählte

Anwendungen. Neben der Frequenz schätzt der Fitting-Algorithmus gleichzeitig auch die statische Durchbiegung, aus der die konventionelle schwere Masse ermittelt werden kann.

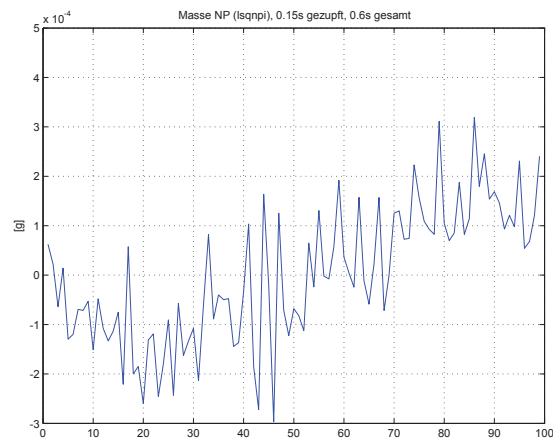


Abbildung 45: Aus 100 Abklingvorgängen ermittelte Masse

AP8 – Theoretische Untersuchung und Optimierung der Belastungszyklen bei der Eichung von Plattformwaagen, d.h. Eichung mittels Ersatzlastverfahren

Alle im öffentlichen Güterverkehr zugelassenen Waagen müssen nach einem so genannten Konformitätsbewertungsverfahren geprüft werden. Dabei werden unterschiedliche Eigenschaften der Waage wie:

- Genauigkeit der Nullstellung
- Wiederholbarkeit
- Richtigkeit ggf. unter Berücksichtigung der Fallbeschleunigung
- Außermittige Belastung
- Empfindlichkeit von nichtselbststeinspielenden Waagen
- Ansprechvermögen
- Taraeinrichtungen
- Stabilität der Gleichgewichtslage
- Eignung für Achslastwägungen bei Straßenfahrzeugwaagen

geprüft.

In Abbildung 46 ist die Verfahrensstruktur bei der Konformitätsbestätigung dargestellt.

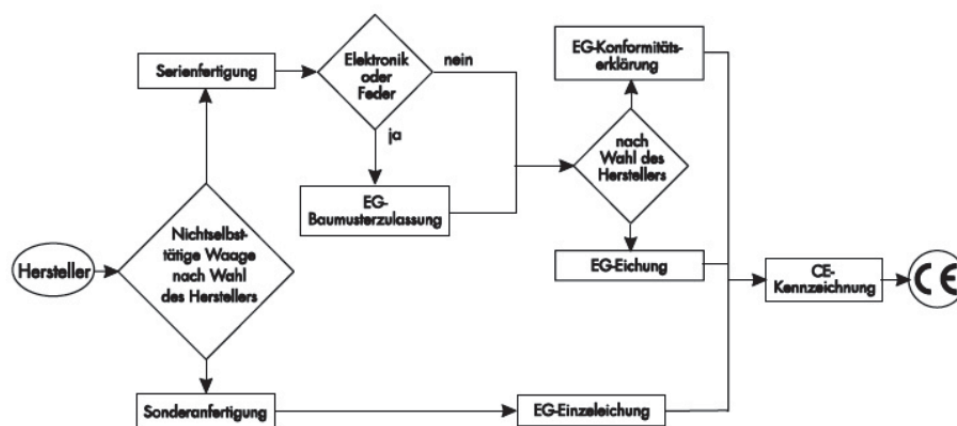


Abbildung 46: Ablauf einer Konformitätsbestätigung

Der Hintergrund des beantragten Arbeitspunktes lag in der Prüfung der Möglichkeiten der Eichung von Straßenfahrzeugwaagen mit dem so genannten „Ersatzlastverfahren“. Während der Bearbeitung des InnoProfile Projektes wurde die aktuelle EURAMET Richtlinie „Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments“ EURAMET/cg-18/v.02 im January 2009 veröffentlicht. Im November 2009 erschien die Neufassung „Gesetzliches Messwesen – Prüfanweisung für nichtselbsttätige Waagen“ GM-P9 NSW. In diesen Richtlinien sind bereits verschiedene Varianten zur Prüfung von Waagen nach dem Ersatzlastverfahren (Prüfung mit Substitutionsgewichten), in Abhängigkeit der Genauigkeitsklasse aufgezeigt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Zu prüfende Einflussgrößen (aus [10])

Genauigkeitsklasse:	I	II	III	III
durch die Prüflast				
Normallast	x	x	x	x
Ersatzlast	-	-	x	x
durch den Prüfling				
Nullstellung	x	x	x	x
Rundung/Auflösung	x	x	x	x
Wiederholbarkeit	x	x	x	x
Zeit Drift während der Messung	x	x	x	x
Transporteinflüsse	-	-	x z.B. bei Kran- waagen	-
durch das Prüfverfahren				
außermittigte Belastung	x	x	x	x
Hysterese beim Staffelfverfahren	-	-	x	x
Fallbeschleunigung <i>nur wenn Eichung nicht am Aufstellungsort</i>	-	x	x	-
durch die Umgebungsbedingungen				
Temperatur	x	x	x	x
Luftdruck	-	-	-	-
Feuchte	-	-	-	-
Verschmutzung z.B. Niederschlag	-	-	x	x
Windeinflüsse/Luftzug	x	x	x	x
Störeinflüsse im Betrieb <i>z.B. Rüttler in der Nähe der Waage</i>	x	x	x	x

Im Rahmen des InnoProfile-Projektes wurde deshalb anhand eines theoretischen Beispiels geprüft, welche Messunsicherheiten sich nach der Eichung nach dem Verfahren mit voller Normallast und nach dem vollständigen Staffelfverfahren ergeben [10].

Es wurde gezeigt, dass die resultierenden Unsicherheiten beim Normallastverfahren etwas geringer als beim Ersatzlastverfahren sind (Tabelle 4).

Einheit in kg	Normallastverfahren	Ersatzlastverfahren
Gesamtmessunsicherheit	25.68	33.95
Gesamtmessunsicherheit (95%)	15.04	18.46

Tabelle 4: Ergebnis der theoretischen Untersuchungen

Für die Prüfung nach dem Normallastverfahren müssen jedoch Kalibriergewichte mit einer Gesamtmasse von 40.000 kg transportiert werden, was das Ersatzlastverfahren zu einer attraktiven Alternative macht.

AP9 – Erforschung und Qualifizierung neuer Lastwechslerprinzipien für automatische Lastwechslervorrichtungen

Um das Verhalten dynamischer Waagen mit digitalem Regler im Vergleich zu Analogreglern untersuchen zu können, wurden im Rahmen des Projektes zwei Einrichtungen zum Lastwechseln auf dynamische Waagen entwickelt. Zur konventionellen mechanischen Belastung wurde ein PC-gesteuerter Lastwechsler entwickelt. Als Aktor kommt hierbei ein Pneumatikzylinder der Firma Festo in Verbindung mit dem entsprechenden elektromagnetischen Schaltventil und einem mechanischen Dämpfer zum Einsatz. In der gewählten Konfiguration ermöglicht dieser Aufbau Lastwechsel von speziellen Massestücken zwischen 1 g und 200 g mit einer Frequenz von bis zu 10 Hz. Die Aufnahme der Massestücke erfolgt über eine selbstzentrierende geschlossene Konuspaarung. Zur Steuerung des Lastwechslers wurde eine mikrocontrollerbasierte Schaltung entwickelt. Die zeitliche Konfiguration der Lastwechselvorgänge ist mit der speziell entwickelten Software komfortabel möglich [11] (siehe Abbildung 47). Mit diesem Lastwechsler können reproduzierbar Lastwechsel auf die Waage ausgeführt werden und das Verhalten des Reglers damit genau untersucht werden.



Abbildung 47: Mechanischer Aufbau des pneumatischen Lastwechslers und Software zur Ansteuerung

Als Alternativverfahren hierzu wurde ein Lastwechsler entwickelt, welcher die Lorentzkraft ausnutzt. Das Grundprinzip dieser Belastungsvariante ist einfach. Zur Erzeugung der notwendigen Lorentzkraft wird ein elektrodynamischer Linearantrieb, bestehend aus einer Spule und einem Magnettopf, verwendet. Um magnetische Hysterese- und Remanenzeffekte des Antriebs auszuschließen, muss die Spuleneinheit aus möglichst magnetisch neutralen Materialien bestehen. Zum Einsatz kommt hierbei ein kommerzieller Antrieb der Firma BEI Kimco Magnets vom Typ LA13-12-000A, dessen Spuleneinheit aus einem Aluminiumträger ($\mu_r=1+2,2 \cdot 10^{-5}$) mit einer Kupferspule ($\mu_r=1-6,4 \cdot 10^{-6}$) besteht. Dieser hat laut Datenblatt eine Kraft/Strom Kopplung von 9,79 N/A und erzielt kurzzeitig eine Maximalkraft von 15,6 N [11]. Um eine reibungsfreie Kopplung zwischen Spule und Magnettopf zu gewährleisten, wurde auf eine mechanische Zwangsführung verzichtet. Somit ist ein externes Positioniersystem zur Einstellung und Fixierung der Relativlage zwischen Spule und Magnettopf notwendig. Zur Vermeidung mechanischer Rückwirkungen der Anschlusskabel der Spule auf das Wägesystem, wurde der Magnettopf auf die Waagschale gestellt und die Spule über ein Positioniersystem mit dem Gestell verbunden. Die erhöhte

Vorlast der Waage durch den Magnettopf stellt keine Einschränkung für das Aufbringen zusätzlicher Lorentzkkräfte dar. Die Masse des Magnettopfes entspricht in etwa der halben Maximallast der Waage (d.h., die Waage befindet sich in etwa im mechanischen Gleichgewicht) und somit kann durch Einprägen von positiven bzw. negativen Strömen durch den externen Spulenantrieb der gesamte Lastbereich der Wägezelle abgedeckt werden.

Dabei kann ein nahezu beliebiger Kraftverlauf zur Belastung erzeugt werden. Für die durchgeführten Experimente fand als Stromquelle eine Universal Source 3245 A der Firma Hewlett Packard Verwendung. Mit diesem Gerät können beliebige Signalverläufe mit einer Auflösung von 1 Mio. Schritten erzeugt werden. Der maximale Strombereich im DCI-Modus beträgt hierbei ± 100 mA bei einer Spannungsbegrenzung von ± 8 V [5]. In Kombination mit dem Spulenantrieb ergibt sich eine rechnerische Zeitkonstante der Stromänderung bei sprungförmiger Spannungsänderung von 0,165 ms. Unter Ausnutzung des gesamten Spannungsbereiches kann somit eine rechnerische Stromänderung von 100 mA/0,02 ms erzielt werden. Das entspricht einer maximalen Kraftänderungsgeschwindigkeit von ca. 50 N/ms. Mit diesen theoretischen Parametern ist der Aufbau gut für dynamische Untersuchungen geeignet. Durch das integrierte GPIB-Interface ist die Einbindung in eine rechnergestützte Steuerung und Messwerterfassung problemlos möglich.

Im Unterschied zur Belastung durch Massestücke wird die reale Massenabhängigkeit des Übertragungsverhaltens der EMK-Waage bei der Belastung durch Lorentzkräfte nicht berücksichtigt. Bei EMK-Systemen mit großer Hebelübersetzung und entsprechender Vorlast ist diese Abhängigkeit jedoch gering. Die Übertragungsfunktion zwischen dem Spulenstrom und der Hebelauslenkung der untersuchten EMK-Wägezelle in Abhängigkeit von der aufgelegten Masse zeigt, dass die Grenzfrequenz des Systems nahezu unabhängig von der Masse auf der Waagschale ist (siehe Abbildung 48). Dieser Umstand bekräftigt die Praxistauglichkeit der „massefreien“ Belastung durch Lorentzkräfte. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass diese Belastungsmethode eine sinnvolle Ergänzung zur Ermittlung dynamisch relevanter Parameter von EMK-Waagen darstellt.

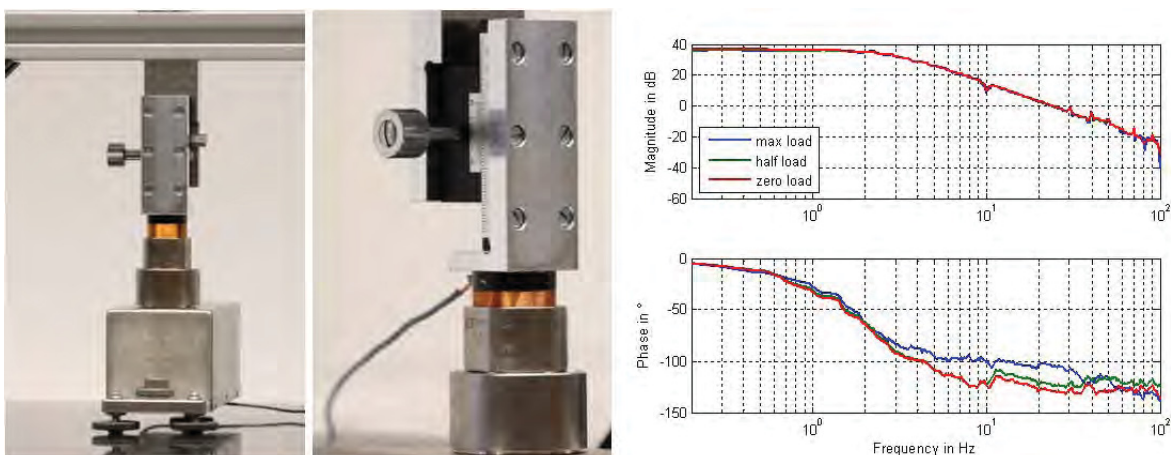


Abbildung 48: Aufbau des Lastwechslers basierend auf dem Prinzip der Lorentzkraft und Amplitudenfrequenzgang der untersuchten Waage in Abhängigkeit der Masse auf der Waagschale

Im Gegensatz zum klassischen Lastwechsel mit Massestücken ist die Belastung mittels Lorentzkraft auch zur Untersuchung und Kalibrierung von Kraftmessungen, die nicht in der Richtung der Schwerkraft erfolgen, geeignet.

Mit den entwickelten Lastwechslern ist eine detaillierte Untersuchung des Reglerverhaltens sowohl für Analogregler als auch für Digitalregler unter reproduzierbaren Versuchsbedingungen möglich.

AP10 – Experimentelle Untersuchung von Massestückzentriereinheiten

Die Aufgabe einer Waage ist die Bestimmung der Masse des Wägegutes. Die Waagenanzeige soll dabei unabhängig von dem Aufstellort auf der Waagschale sein. Existiert eine Abhängigkeit der Waagenanzeige vom Aufstellort, so wird dies als „Ecklastabhängigkeit“ bezeichnet. Bei Präzisionswaagen werden die mechanischen Wägesysteme einem Ecklasttest unterzogen und die Ecklastabhängigkeit wird weitgehend beseitigt.

Bei hochgenauen Komparatorwaagen ist ein mechanisch-elektrisches Justieren im Rahmen der Auflösung der Komparatoren oftmals nicht möglich. Außermittige Belastungen im Submillimeterbereich rufen hierbei deutliche Änderungen der Anzeige hervor. Zur Vermeidung von Messfehlern bei Waagen durch außermittig aufgelegte Gewichtsstücke werden Messestückzentriereinheiten in Präzisionswaagen verbaut. Massestückzentriereinheiten bewegen ein außermittig aufgelegtes Gewichtsstück selbstständig in Richtung der Nulllage (vertikales Lot unter dem Drehpunkt) um störende Momente zu verringern oder zu vermeiden. Das Ziel einer solchen Einheit ist die Bewegung eines Massestücks in eine ideale vertikale Flucht zum Messkraftaufnehmer. Eine solche ideale Ausrichtung des Massestücks ist mit passiven Systemen (ohne zusätzliche Aktoren) bei einmaligem Auflegen des Gewichtes nicht möglich. Durch mehrmaliges Aufheben und Ablegen des Gewichtes von der Zentriereinheit kann das Massestück einer Idealen vertikalen Position sehr gut angenähert werden. Das Prüfungsgewicht wird dabei auf die Zentriereinheit aufgelegt und die erste Zentrierung abgewartet. Nach der ersten Zentrierung befindet sich das Gewichtsstück näher an der gewünschten Nulllage wie vor der Zentrierung. Anschließend wird das Gewicht angehoben wodurch sich die Zentriereinheit unter dem Gewicht neu Positioniert (horizontale Ausrichtung der Auflageplatte). Nun wird das Gewicht erneut auf die Zentriereinheit abgesetzt und bewegt sich mit deren Hilfe ein weiteres Stück in Richtung der Nulllage. Nach mehreren Iterationen dieses Vorgangs kann von einer ausreichenden Genauigkeit der Nullposition ausgegangen werden. Die Anzahl der Iterationen hängt von der verwendeten Messestückzentriereinheiten und deren Ausführung ab. Eine direkte Ausrichtung der Nulllage mit nur einer Iteration ist aufgrund von Reibkräften und Reibmomenten, Rückstellkräften sowie Schwerpunktverlagerungen der Messestückzentriereinheiten nicht möglich. Durch geeignete Konstruktionen ist es möglich die Anzahl der durchzuführenden Wiederholungen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren und damit Mess- und Zeitaufwand zu verringern. Um eine Gewichtsauflage komfortabler bereitzustellen und einer wachsenden Anzahl an geometrischen Formen bei Prüfungsgewichten gerecht zu werden ist ein overschaliger Waagenaufbau von Vorteil. Auswahlkriterien für eine Massestückzentriereinheit für Präzisionswaagen und Massekomparatoren sind damit die Ausführung in overschaliger Bauweise und die Möglichkeit ein dezentral aufgelegtes Massestück weitestgehend in die Nulllage zu befördern. Auf Grundlage dieser Kriterien werden nachfolgend drei unterschiedliche Bauarten von Messestückzentriereinheiten verglichen und bewertet.

1 Hängendes Pendel

Das Prinzip des Hängenden Pendels ist ein alt bekanntes und einfaches Prinzip zum lotrechten Positionieren von Waagestücken. Eine Waagschale wird dabei an einen Drehpunkt aufgehängt und kann somit aufgelegte Waagestücke lotrecht Positionieren. Der Drehpunkt ist als Festkörpergelenk realisiert und ermöglicht eine Bewegung um zwei Raumachsen, sodass die hängende Pendelschale ein Gewicht selbstständig in Richtung der Nulllage befördern kann. Die Justagegewichte dienen zur horizontalen

Justage der unbelasteten Waagschale. Eine zweidimensionale Skizze eines solchen Aufbaus zeigt Abbildung 49.

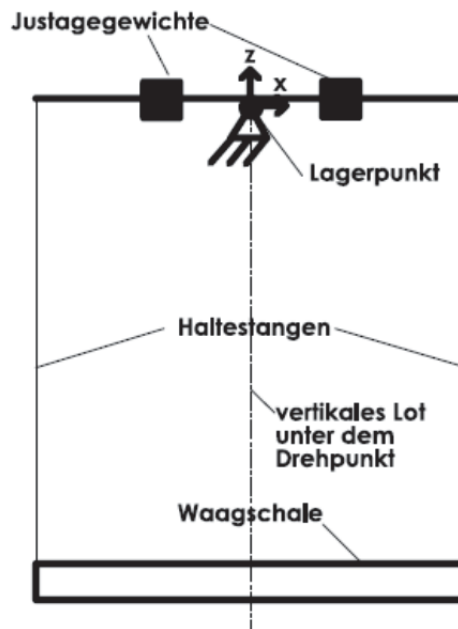


Abbildung 49: Prinzipskizze Pendelschale (x-z Ebene)

Das Prinzip des hängenden Pendels ermöglicht eine Bewegung der Waagschale mit einem Festkörpergelenk, welches lediglich innere Reibung aufweist. Die dadurch auftretenden Reibungseinflüsse sind gering und gut reproduzierbar. Das Federgelenk wirkt bei vorhandener Auslenkung wie eine Biegefeder und erzeugt somit störende Rückstellmomente, welche eine exakte Positionierung des Waagstückes in das vertikale Lot unter dem Drehpunkt verhindern. Nachteilig wirkt sich bei dieser Ausführung einer Massestückzentriereinheit auch die von oben angebrachten Haltestangen aus, wodurch sie nicht zu den oberhalbigen Konstruktionen gezählt werden kann.

2 Federschale

Die Federschale ist eine selbstzentrierende Waagschale, welche zu den oberhalbigen Wägesystemen gezählt wird. Die Waagschale besitzt eine seitliche Beweglichkeit in zwei vertikalen Ebenen (x-z, y-z Ebene), um dezentral aufgelegte Gewichtsstücke in Richtung der Lotlinie zu befördern. Die Beweglichkeit der Waagschale wird über Federgelenke realisiert, welche in einer trapezförmigen Anordnung mit einem Gestell verbunden sind. Das Prinzip der Federschale ist ein von der Sartorius GmbH patentierter Aufbau, welcher unter dem deutschen Gebrauchsmuster G88 05 155.2 hinterlegt ist [12]. Eine Skizze aus diesem Gebrauchsmuster ist in Abbildung 50 zu betrachten. Die Waagschale folgt durch die Blattfedergelenkführung einer Drehbewegung um einen virtuellen Drehpunkt D, welcher sich im Schnittpunkt der verlängerten Blattfederlinien oberhalb der Zentriereinheit befindet. Die Bewegung der Waagschale wird von der inneren Reibung der Blattfedergelenke sowie von deren Rückstellkraft beeinflusst. Reibung zwischen Festkörpern findet nicht statt, was zu einer guten Reproduzierbarkeit der Waagschalenbewegung führt.

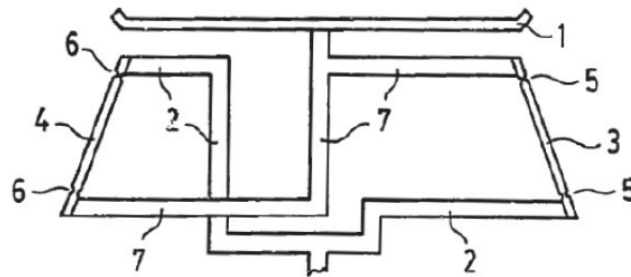


Abbildung 50: Federschale (Prinzipskizze [12]) mit Waagschale 1, Gestell 2, fest mit Gewichtskraftaufnehmer verbunden 3, Blattfedergelenke 4 und 5, Dünnstellen der Blattfederlenker 6, bewegliches Gestell 7

3 Rollenschale

Die Rollenschale erreicht ihre selbstzentrierende Wirkung, indem sie eine hängende Waagschale (hängendes Pendel) durch eine geeignete mechanische Konstruktion nachbildet (vgl. Abbildung 51). Die Oberschalige Waagschale erreicht durch eine Rollenlagerung seitliche Beweglichkeit in zwei vertikalen Ebenen (x-z, y-z Ebene), um Massestückzentriereinrichtungen 13 außermittig aufgelegte Gewichtsstücke selbstständig in eine mittige Position zu bewegen. Rückstellkräfte durch Federn sind in diesem Aufbau nicht vorhanden.

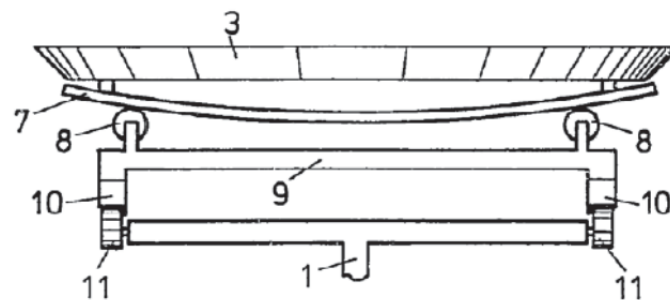


Abbildung 51: Rollenschale (Prinzipskizze [13]) mit Lastaufnehmer 1, Waagschale 3, Kreisbogenförmige Kufen 7 und 8 sowie 10, Rollenlager 11, Zwischenteil 9

Das Prinzip der Rollenschale ist ein von der Sartorius GmbH patentierter Aufbau, welcher unter dem deutschen Gebrauchsmuster G8317130.4 hinterlegt ist [13].

4 Vergleich der Massestückzentriereinheiten

Die beschriebenen 3 Varianten der Massestückzentriereinheiten wurden im Rahmen des Projektes modelliert und mechanisch simuliert [14].

Zum Vergleich der drei unterschiedlichen Massestückzentriereinheiten werden unterschiedliche Aspekte berücksichtigt. Bedienbarkeit, Beweglichkeit sowie allgemeine konstruktive Gegebenheiten der einzelnen Aufbauten werden in die Bewertung einbezogen. Die Pendelschale ist eine altbewährte und weitläufig bekannte Massestückzentriereinheit. Die Vorteile dieses Aufbaus liegen in der einfachen

Konstruktion und dem bekanntem Prinzip. Die Realisierung des Drehlagers als Federgelenk bringt gute Eigenschaften mit sich. Bei einem Festkörpergelenk wirken lediglich innere Reibkräfte welche Bewegungsenergie in Form von Wärme erzeugen. Ein Festkörpergelenk ist beständig gegen Verschmutzung und erlaubt eine gut reproduzierbare Bewegung. Außerdem ist eine spielfreie Bewegung mit Federgelenken möglich. Nachteilig ist die Rückstellkraft, welche ein Festkörpergelenk beim auslenken erzeugt. Den größten Nachteil der Pendelschale stellt jedoch das Haltegestänge oberhalb der Waagschale dar. Dieses Gestänge behindert die Bestückung der Waagschale, weshalb ein oberhalbiger Aufbau von Vorteil ist. Die Federschale ist ebenfalls mit Drehfedern gelagert, woraus sich die obengenannten Vorteile ergeben. Der Fertigungsaufwand der Federschale ist jedoch etwas höher, im Gegensatz zur Pendelschale. Vorteilhaft ist der oberhalbige Aufbau. Nachteilig bei der Federschale ist die begrenzte Belastbarkeit der Federgelenke. Bei zu großer Belastung besteht die Gefahr der Knickung der Federn. Die Rollenschale erzeugt bei einer Auslenkung keine Rückstellkraft durch Federgelenke, was als Vorteil anzusehen ist. Der fertigungstechnische Aufwand der Rollenschale ist mit dem der Federschale vergleichbar. Der schwerwiegendste Nachteil der Rollenschale liegt in den nicht reproduzierbaren Rolleigenschaften der Kugellager. Durch die ständig wirkende Reibkraft der Kugellager ist eine Positionierung der Rollenschale im Lot (Schwerpunkt im Lot) theoretisch nicht möglich. Die Führungsbahnen der Kugellager und die Kugellager selbst müssen sehr sauber gehalten werden. Unsaubere Führungsbahnen oder Kugellager beeinflussen die Bewegungseigenschaften der Rollenschale negativ. Die genannten Vorteile und Nachteile der einzelnen Massestückzentriereinheiten sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

	Vorteile	Nachteile
Pendelschale	+ Reproduzierbare Reibung	– Federrückstellkräfte
	+ Nur eine Drehfeder pro Bewegungsebene	– Schlechte Bedienbarkeit da nicht oberhalbig
	+ Verschmutzungsempfindlich	
Federschale	+ Gute Bedienbarkeit	– Federrückstellkräfte
	+ Reproduzierbare Reibung	
	+ Verschmutzungsempfindlich	
Rollenschale	+ Keine Federrückstellkräfte	– Schlecht reproduzierbare Reibverhältnisse
	+ Gute Bedienbarkeit	– Verschmutzungsempfindliche Lager und Laufflächen
	+ Flacher Aufbau möglich	– Lagerspiel bei Kugellagern
		– Lotrechte Positionierung nicht möglich

Tabelle 5: Vergleich der Massestückzentriereinheiten

AP11 – Untersuchung und Kompensation von Windlasten bei Fahrzeugwaagen und Silowaagen

Möglichkeiten der Silowägungen

Prinzipiell gibt es verschiedene Möglichkeiten einen Silo zu wiegen und damit die Masse seines Inhaltes zu bestimmen sowie dessen Befüllung bzw. Entleerung zu steuern. Die Lösung mit der höchsten Präzision ist die Verwendung von kompletten Wägezellen. Dazu müsste der Silo angehoben und unter jedem Bein eine solche Wägezelle montiert werden, vgl. Abbildung 52a). Mit solchen Wägezellen können im besten Fall Messunsicherheiten in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-3}$ erreicht werden. Der Nachteil ist die sehr aufwendige Montage und der hohe Preis. Eine wesentlich einfachere und günstigere Lösung ist das Anbringen von Dehnungsaufnehmern direkt an den Silobeinen. Mit diesen wird dann die Verformung der Silobeine in Abhängigkeit des Silogewichts gemessen. Die bestmöglich erreichbare Messunsicherheit liegt dabei in der Größenordnung von $1 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$.

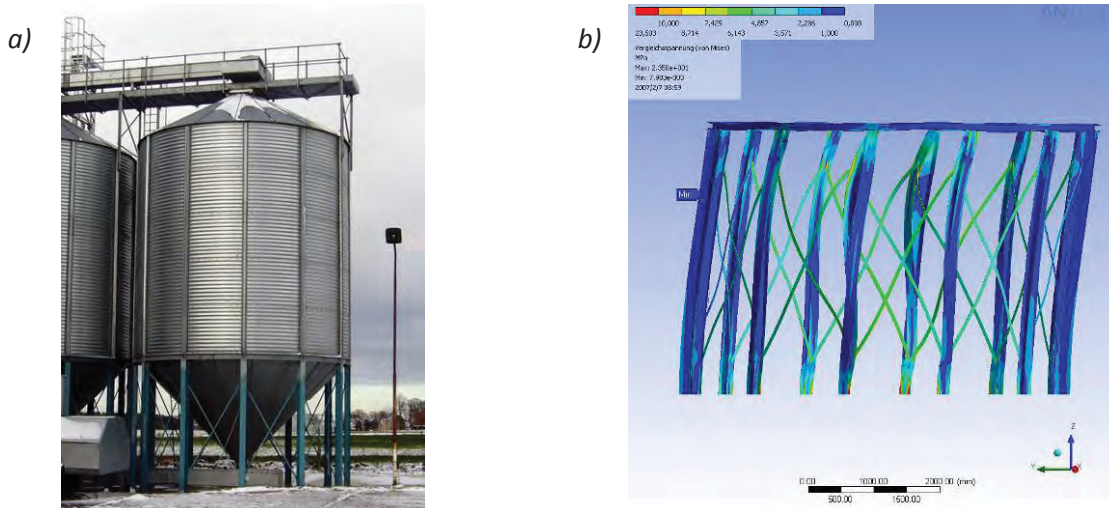


Abbildung 52: a) Silo, aufgestellt auf zwölf Beinen (blau); b) FEM-Simulation der Verformung der Silobeine bei einer horizontalen Windlast von 35 kN

Einfluss der Windlast auf Silo- und Fahrzeugwägungen

Anders als bei Messungen im Labor wirken auf Fahrzeug- bzw. Silowaagen teilweise extreme Umwelteinflüsse. Hier sind erster Linie Temperaturänderungen aber auch Windlasten zu nennen. Der Einfluss der Temperatur sind komplex, aber in der Literatur beschrieben. Sie werden im Wesentlichen durch Multisignalerfassung und entsprechende Korrekturalgorithmen teilweise kompensiert. Durch die sehr großen Temperaturänderungen (Tag/Nacht und Sommer Winter) ist die Leistungsfähigkeit der Temperaturkompensation aber deutlich geringer als bei vergleichbaren Laborlösungen.

Die Wirkung des Windes auf Fahrzeug- und Silowägungen ist in der Literatur weitaus weniger berücksichtigt. Deshalb wurden zu den statischen Einflüssen des Windes auf Silowägungen im Rahmen einer Diplomarbeit [17] umfangreiche theoretische Untersuchungen angestellt.

Zunächst wurde die Kraftwirkung eines konstanten Windes auf einen idealisierten Silo analytisch abgeschätzt. Der zugrunde liegende Referenz- und Böenwinddruck wurde aus Windkarten abgelesen, vgl. Abbildung 53.

Es wurde festgestellt, dass die durch den Wind erzeugte horizontale Seitenkraft auf Basis gleichzeitiger Kraft- bzw. Dehnungsmessungen an allen Silobeinen sehr gut kompensiert werden kann. Mittels FEM-Berechnungen (siehe Abbildung 52b) wurden die von der Seitenkraft erzeugten Dehnungen und Spannungen in den Silobeinen simuliert. Für den in Abbildung 52 gezeigten Silo sind die Biegespannungen in 70% der Höhe der Beine minimal. In dieser Höhe sollten für eine optimale Kompensation des Fehlereinflusses der Seitenkraft zwei Dehnungsaufnehmer Rücken an Rücken angebracht werden.

Darüber hinaus erzeugt die seitliche Anströmung allerdings auch eine zusätzliche Auftriebskraft, die von allen Sensoren gleichermaßen gemessen wird und nicht kompensiert werden kann. Für einen Silo nach Abbildung 52 mit einer Befüllung von 150 t ergibt sich ein Fehlereinfluss des Auftriebs von $2 \cdot 10^{-3}$ der Maximallast. Somit ist auch dieser Fehlereinfluss vergleichsweise klein und kann mit den direkt an den Beinen applizierten Dehnungsaufnehmern gar nicht nachgewiesen werden. Bei Verwendung der beschriebenen Wägezellen liegt der Fehlereinfluss in der Größenordnung der Messunsicherheit der Wägezellen.

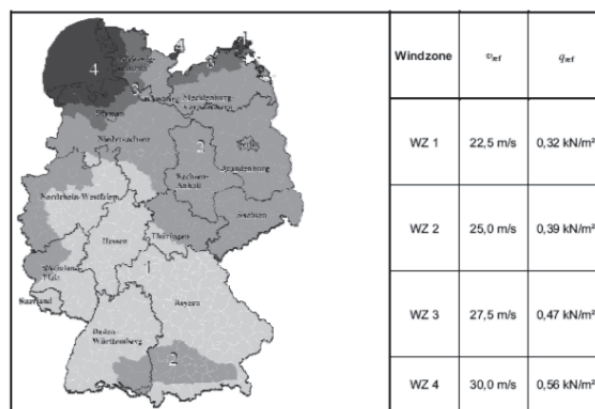


Abbildung 53: Windkarte Deutschland zur Ablese von Referenz- und Böenwinddruck

Im Vergleich zu den Fehlereinflüssen der Temperatur ist der Einfluss des Windes auf die Silowägungen in einer vernachlässigbaren Größenordnung. Die gewonnenen Ergebnisse sind prinzipiell auch auf Straßenfahrzeugwaagen übertragbar. Daher wurden im Anschluss an diese Untersuchungen keine weiteren Forschungen auf dem Gebiet des Windeinflusses auf Silo- und Straßenfahrzeugwaagen vorangetrieben.

Einfluss des Windes auf hochgenaue Labormessungen

Auf Basis der Untersuchungen zum Einfluss des Windes auf Silowägungen entstanden auch Überlegungen zu Fehlereinflüssen des Windes auf hochgenaue Laborwägungen. Die derzeit erreichbare relative Messunsicherheit mit dem Prototypkomparator CCL 1007 von Sartorius („Genaueste Waage der

Welt“) liegt bei $1 \cdot 10^{-10}$. Kleinste Verkippungen des gesamten Labors von Bruchteilen einer Winkelsekunde führen hier schon zu nachweisbaren Fehlereinflüssen auf das Wägeergebnis. Auf Basis der durchgeführten Berechnungen können die horizontalen Windlasten auf Gebäude mit mehreren Tonnen abgeschätzt werden und somit zu Verkippungen des gesamten Gebäudes und damit zu Fehlereinflüssen auf hochgenaue Laborwägungen führen.

Für die Erfassung dieser Verkippungen werden hochgenaue und absolut messende Inklinometer benötigt. Dazu durchgeführte Untersuchungen ergaben aber, dass die für den Prototypkomparator schon relevanten minimalen Verkippungen mit kommerziell erhältlichen Inklinometern nicht aufgelöst werden können.

Auch darauf Basierend entstand die Idee zur Entwicklung eines hochgenauen Inklinometers (siehe Arbeitspunkt 12 „Alternative Verfahren“).

AP12 – Alternative Verfahren

Metrologisch rückführbare Materialprüfeinrichtung MRMPE

Im Rahmen des SensoPlas Projektes (2006-2009) war das IPMS als Unterauftragnehmer an der Projektbearbeitung beteiligt. Das Ziel aus wägetechnischer Sicht war hier die Entwicklung einer DMS (Dehnmessstreifen) basierten Wägezelle aus Kunststoff für low-cost Anwendungen. Die Dehnmessstreifen sollten dabei direkt mittels Sputtern auf den Kunststoff aufgebracht werden.

Der Schwerpunkt der Arbeiten am IPMS war dabei die Untersuchung der wägetechnisch relevanten Werkstoffparameter der potentiell verwendbaren Kunststoffe. Die wichtigsten Werkstoffparameter sind das Kriechen und die Hysterese. Dazu wurde am IPMS die Metrologisch rückführbare Werkstoffprüfeinrichtung (MRMPE) entwickelt.

In diese Materialprüfeinrichtung werden die Wägezellen, die die Form von Doppelbiegebalken besitzen, eingespannt, (siehe Abbildung 54). Anschließend werden Kräfte in Form von definierten Massestücken an die Wägezellen angehängt und deren zeit-, last-, temperatur- und feuchteabhängige Verformung gemessen. Die Messung wird dabei mit einem speziell für diese Anwendung entwickelten Interferometer (basierend auf SIOS Meßtechnik Ilmenau Technologie) durchgeführt.

Im Ergebnis des SensoPlas Projektes zeigte sich, dass die Effekte wie Kriechen und Hysterese der betrachteten Kunststoffe im Bereich von $>1\%$ der erzeugten Verformung liegen. Die MRMPE war sehr gut geeignet um diese recht großen Effekte mit vernachlässigbaren relativen Messunsicherheiten zu bestimmen.

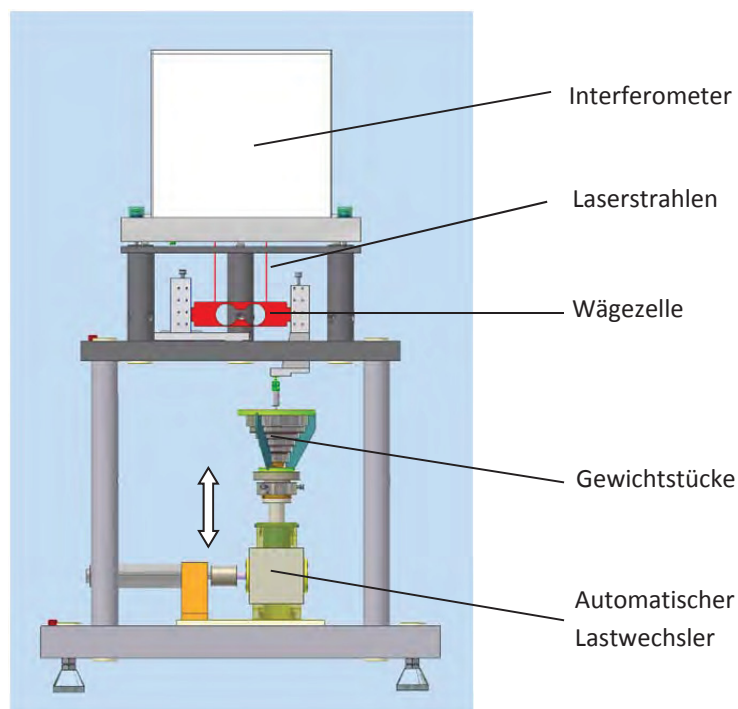


Abbildung 54: Metrologisch rückführbare Materialprüfeinrichtung MRMPE

Verwertung der MRMPE für das InnoProfile Projekt

Im Rahmen der Untersuchungen im SensoPlas Projekt zeigte die MRMPE das Potential auch in der Wägetechnik gebräuchliche und darüber hinaus auch alternative High-End Werkstoffe zu untersuchen. Da die Größenordnung der relativen Effekte des Kriechens und der Hysterese hier aber wesentlich kleiner ist, mussten einige essentielle Weiterentwicklungen der MRMPE im Rahmen des InnoProfile Projektes vorangetrieben werden. Die wichtigsten Schritte umfassten hier die Klimatisierung des Gerätes, die Einspannung der Wägezellen, die Krafteinleitung und das mechanische Prinzip der Aufstellung des Gerätes.

Zum Beispiel wurde dazu eine Klimabox [18] entwickelt, von der Firma IMB Jena GmbH hergestellt und in einem IPMS Labor in Betrieb genommen. Mit diesen Maßnahmen wurde unter anderem eine Langzeitstabilität der interferometrischen Verformungsmessung von besser als 1 nm pro Woche erreicht, (siehe Abbildung 55). Dies ist insbesondere für die Ermittlung des Kriechens der Wägezellenverformung bei konstanter Last entscheidend.

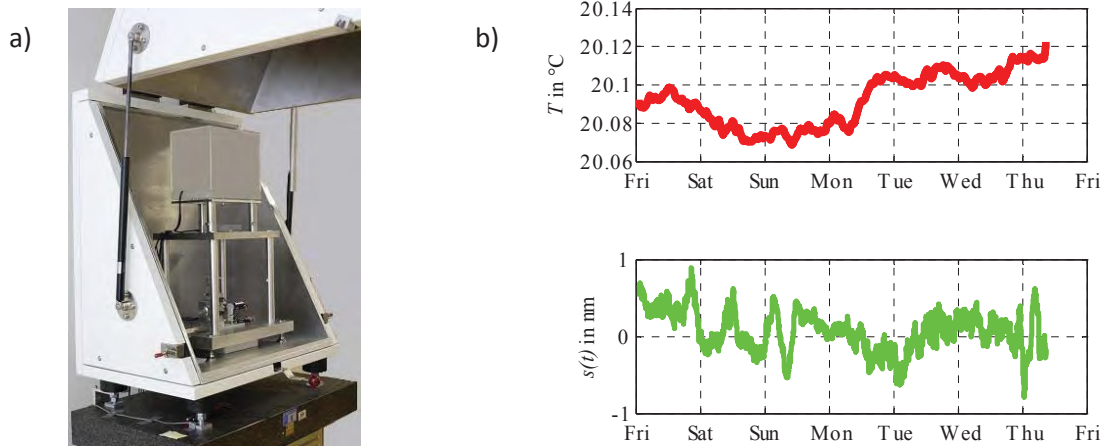


Abbildung 55: a) MRMPE aufgestellt in Klimabox; b) Langzeitstabilität der interferometrischen Verformungsmessung $s(t)$ bei der Temperatur T , gemessen gegen einen Referenzspiegel

Mit diesen Verbesserungen wurde es möglich, die wägetechnisch relevanten Parameter mit ausreichend kleinen Messunsicherheiten zu untersuchen. Als Beispiel ist die Messung des Kriechens einer Wägezelle aus Spezial-Aluminium dargestellt. Das relative Kriechen (Abbildung 56 rechts) entspricht der zeitabhängigen Verformung $s(t>0)$ normiert durch die spontane Verformung bei $s(t=0)$. Hier wurde ein relatives Kriechen Φ_{rel} nach einer Stunde Belastung von $1,72 \cdot 10^{-4}$ mit einer Messunsicherheit von $0,1 \cdot 10^{-4}$ (Vertrauensbereich 95%) ermittelt. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass die MRMPE mit den erfolgten Weiterentwicklungen auch für die Messung der wägetechnisch relevanten Parameter von High End Werkstoffen geeignet ist. Der weiter entwickelte Aufbau wurde auf einer internationalen Messtechnikkonferenz vorgestellt [19].

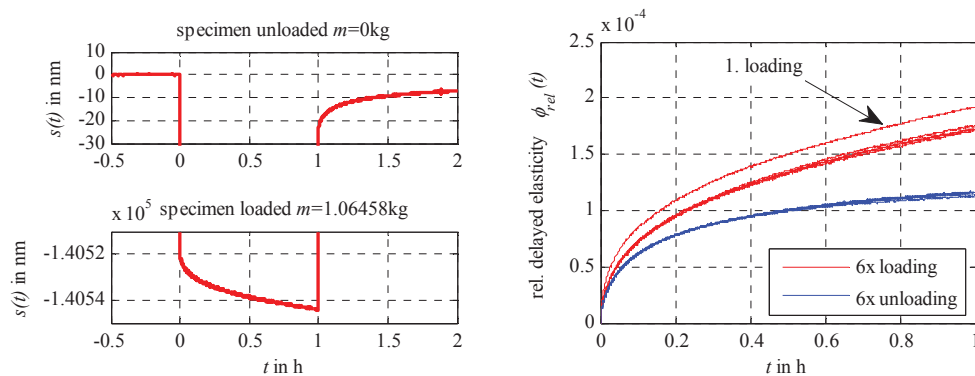


Abbildung 56: Ermittlung des relativen Kriechens Φ_{rel} einer Wägezelle aus Spezial-Aluminium auf Basis einer Verformungsmessung $s(t)$

Patentidee Kombinierte Wägezelle

Weitere Untersuchungen wurden mit den Werkstoffen Quarzglas und Silizium durchgeführt. Diese zeigten ein noch deutlich höheres Potential als die in der Wägetechnik gebräuchlichen Werkstoffe Aluminium und Stahl. Ein technologisches Problem dieser Werkstoffe ist allerdings die mechanische Bearbeitung. Hier bieten Aluminium und Stahl größere Freiheiten. Darüber hinaus sind diese Werkstoffe vergleichsweise teuer und in erster Linie als planer Wafer erhältlich. Eine Herstellung von Wägezellen in der klassischen monolithischen Doppelbiegebalkenform aus diesen Materialien ist daher äußerst schwierig.

Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen und den Untersuchungen der Kunststoffe entstand im Laufe des InnoProfile Projektes die Idee den low-cost-Werkstoff Kunststoff geschickt mit High-end-Werkstoffen zu kombinieren und somit eine Wägezelle herzustellen. Dabei sollten die relevanten Teile aus dem High-End Werkstoff und die Verbindungselemente aus Kunststoff hergestellt sein. Zu diesem Konzept eines Verbundsensors wurden verschiedene Untersuchungen angestellt. Eine Darstellung einer FEM-Simulation ist in Abbildung 57 gezeigt.

Parallel dazu wurde eine Patentrecherche durchgeführt. Diese brachte eine relevante Entgegenhaltung hervor, die sehr genau das geplante Konzept abdeckt [20]. Die Arbeiten an dieser Patentidee wurden folglich eingestellt.

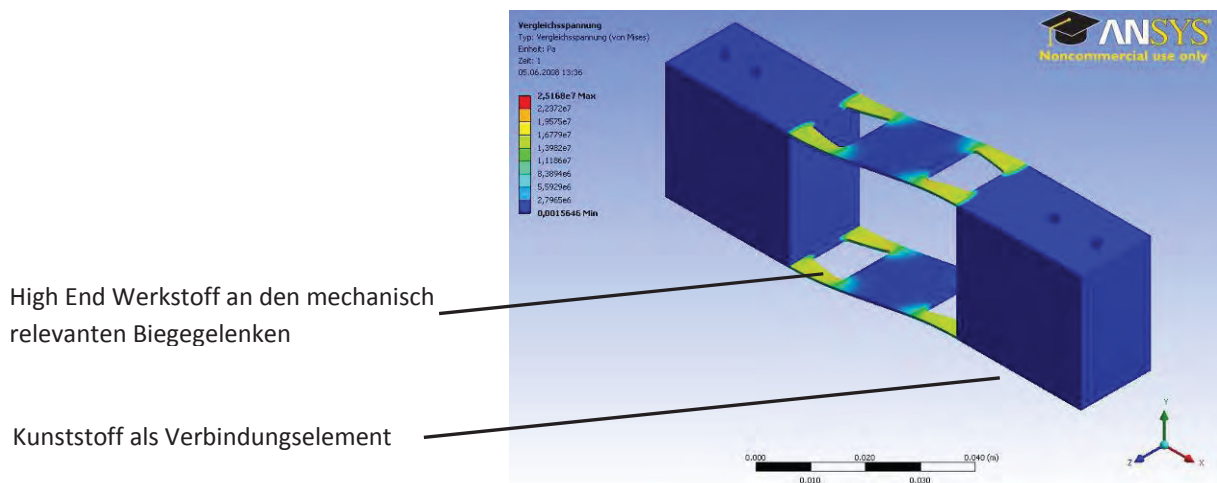


Abbildung 57: FEM Simulation der Vergleichsspannungen in einem Verbundsensor

Inklinometer auf Basis von EMK-Wägezellen

In Untersuchungen zu Störeinflüssen auf hochgenaue Messungen mit der Prototypkomparatorwaage CCL 1007 („genaueste Waage der Welt“) wurden im Rahmen des InnoProfile Projekts auch kleinste Neigungen und Verkipnungen des Wägesteins bzw. des Laborfundaments identifiziert. Diese Verkipnungen liegen allerdings im Bereich von Bruchteilen einer Winkelsekunde und konnten mit Messverfahren nach dem Stand der Technik nicht eindeutig nachgewiesen bzw. von anderen Einflüssen getrennt werden.

Auf Basis der vielfältigen Untersuchungen an EMK Waagen in den Arbeitspaketen 1-4 entstand die Idee seriennahe monolithische EMK-Wägezellen zu nutzen um ein hochgenaues Inklinometer zur Messung von absoluten Neigungen zu entwickeln. Grundlegend wird die Wägezelle dabei hängend gelagert und fungiert als ein Pendel mit einer Hebelübersetzung, siehe Abbildung 58. Mit dem optischen Nulllageindikator des EMK-Systems konnten nun die geringen Winkelverkipnungen des Wägesteines reproduzierbar nachgewiesen werden. Diese getätigten Voruntersuchungen zeigten das hohe Potenzial des gewählten Messprinzips eindrucksvoll. Im Rahmen einer Masterarbeit [21] wurden theoretische Betrachtungen angestellt, ein Prototyp aufgebaut und hierbei eine Winkelauflösung von 0,003“ unter atmosphärischen Bedingungen erzielt. Für eine Überführung der Idee zu einer Praxistauglichen Lösung sind allerdings in Zukunft noch umfangreiche Forschungsarbeiten nötig. Für eine weitere Reduzierung von Störeinflüssen sollte das System zum Beispiel im Vakuum betrieben werden. Dazu ist unter anderem die Entwicklung eines vakuumtauglichen Nulllageindikators mit geringer Verlustleistung nötig.

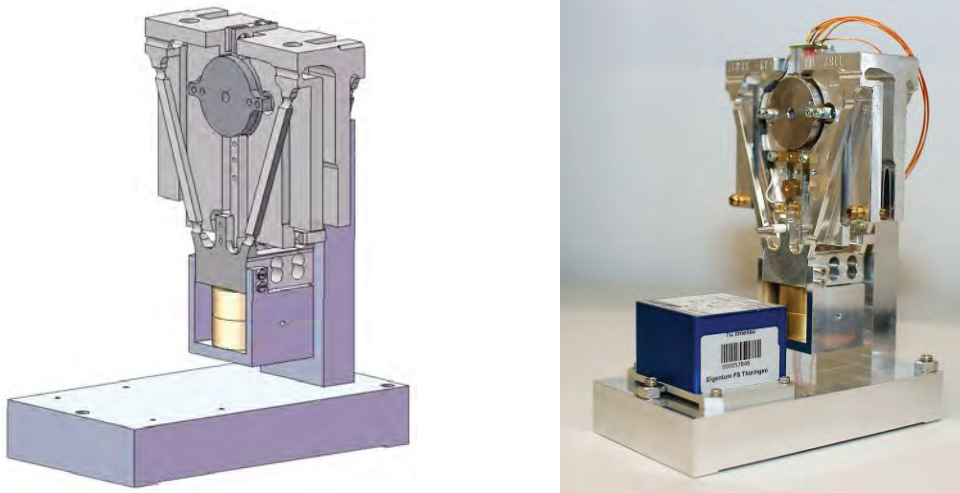


Abbildung 58: Grundprinzip des Inklinometers auf Basis einer hängend gelagerten EMK-Wägezelle

Kraft-Weg- Messsystem auf Basis von EMK-Wägezellen

Während der Bearbeitung des InnoProfile Projektes zeigte sich, dass EMK-Wägesysteme neben dem eigentlichen Einsatzfall zur Masse- bzw. Kraftbestimmung in Verbindung mit einer digitalen Regelung auch als hochgenaue Positioniersysteme eingesetzt werden können. Ein EMK-System beinhaltet alle notwendigen Komponenten: elektrodynamischer Aktuator, Linearführung und Positionssensor. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit einem EMK-System eine Positionsauflösung im Subnanometerbereich und ein direkter Verstellbereich von ca. 100 μm erreicht werden können. Der Verstellbereich kann durch Kombination mit einer zusätzlichen Linearführung quasi beliebig erweitert werden. Das System bietet somit die Möglichkeit gleichzeitig einen Weg x der Waagschale vorzugeben und eine Rückstellkraft F zu messen, vgl. Abbildung 59. Die Rückstellkraft ist hier dann von der erzeugten Federkraft des Messobjekts, das auf die Waagschale drückt (z.B. einem Cantilever) abhängig. Der Weg x wird in Abhängigkeit der Hebelübersetzung mit dem Nulllageindikator des Wägesystems ermittelt. Die vom Stellweg x und der Federsteifigkeit des Messobjektes abhängige Kraft F wird über den elektrodynamischen Aktuator gemessen.

Das System zeichnet sich durch einen kompakten und kostengünstigen Aufbau aus und hat exzellente metrologische Eigenschaften. Für dieses neuartige Verfahren wurde ein Patentantrag eingereicht (Aktenzeichen DPA 10 2011 111 238.7). Für die Überführung in die Praxistauglichkeit sind auch hier wieder umfangreiche weitere Forschungsarbeiten nötig. Zum Beispiel muss das System zur metrologisch rückführbaren Erfassung der Position des Messtisches mit einer zusätzlichen laserinterferometrischen Wegmessung kombiniert werden.

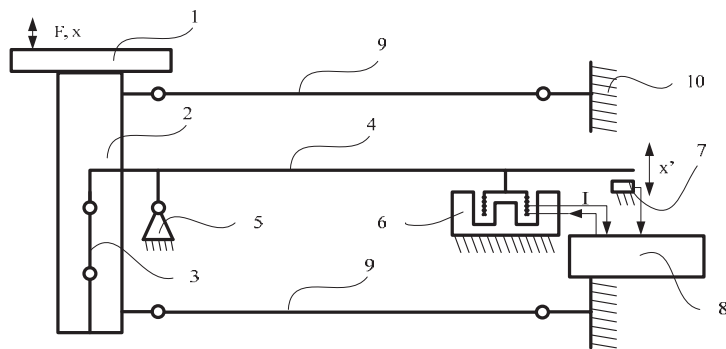


Abbildung 59: EMK-Wägesystem zur Ermittlung von Kraft- Weg-Kennlinien mit Waagschale bzw. Messtisch 1, Koppelstück 2, Koppelband 3, Übersetzungshebel 4, Hebellager 5, Elektrodynamischer Aktuator 6, Lageindikator 7, Regeleinrichtung 8, Parallelführung 9, Fundament 10

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Abbildung 60 ist die relative Verteilung der entstandenen Kosten auf die unterschiedlichen Ausgabenpositionen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Großteil der Gesamtkosten des Projektes in der Position 812 (Beschäftigte E12-E15) entstanden ist. Die zweitgrößte Ausgabenposition ist Position 850 (Gegenstände von mehr als 410 Euro). Die Positionen 812 und 850 umfassen ca. 90% der Gesamtkosten des Vorhabens.

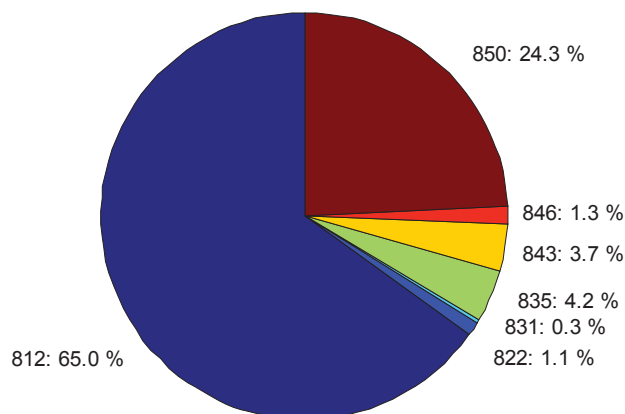


Abbildung 60: Relative Verteilung der entstandenen Kosten auf die Ausgabenpositionen

Die im Projekt entstandenen Kosten entsprechen im Wesentlichen dem im Projektantrag bewilligten Finanzierungsplan. In Abbildung 61 sind die bewilligten Kosten den tatsächlich entstandenen Kosten gegenübergestellt.

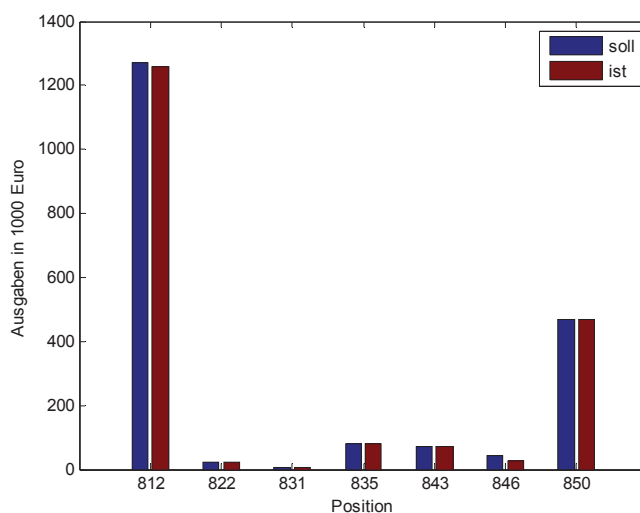


Abbildung 61: Gegenüberstellung der bewilligten und der entstandenen Kosten

Die größten relativen Abweichungen zwischen bewilligten und entstandenen Kosten treten in der Position 846 auf. Dort sind vor allem die im Antrag geplanten Auslandsaufenthalte nicht im vollen

Umfang wahrgenommen worden. An dieser Stelle wäre etwas mehr Flexibilität bei der Verwendung von Mitteln für Auslandsreisen wünschenswert.

Im Folgenden soll kurz auf die Geräte mit einem Finanzierungsumfang von mehr als 10.000 € eingegangen werden. Zu diesen gehören:

1. Messplatz
2. Vibrometer
3. Vakuumklimaprüfkammer
4. Thermografiesystem
5. Schwingungserregungssystem

Messplatz

Der im Rahmen des Projektes zusammengestellte Messplatz bildet die elementare Grundlage der experimentellen Untersuchungen zur digitalen Regelung dynamischer und hochgenauer EMK-Waagen. Das Kernstück des Messplatzes stellt ein PXI-System der Firma National Instruments dar. Dieses PXI-System beinhaltet verschiedene Module zur Datenerfassung und Datenausgabe. Als Recheneinheit ist ein PC-kompatibler Einschub enthalten, der die digitale Signalverarbeitung, Speicherung, Visualisierung und Kommunikation mit dem Host-PC übernimmt. Das Betriebssystem ist hierbei ein Echtzeitsystem der Firma NI.

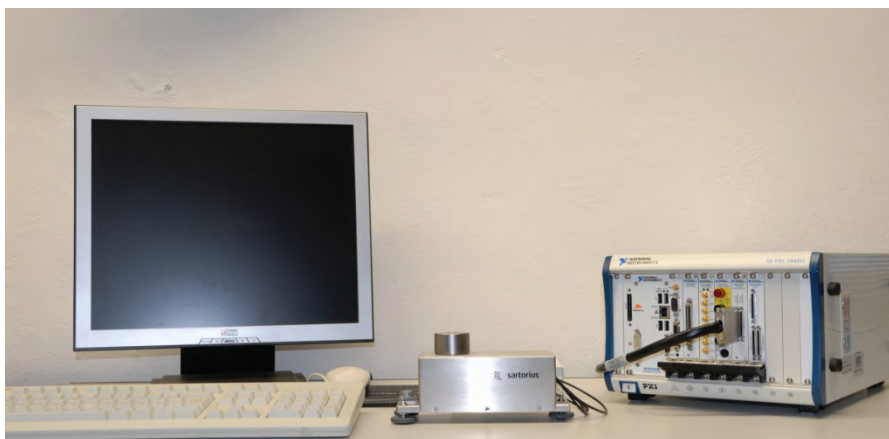


Abbildung 62: PXI-System der Firma National Instruments

Vibrometer

Zur berührungslosen Schwingungsanalyse an Waagen und Waagenbauteilen wurde ein Laservibrometer der Firma SIOS Meßtechnik GmbH erworben. Dieses Laservibrometer hat gegenüber Produkten von Mitwettbewerbern wie der Firma Polytec den entscheidenden Vorteil, dass auch statische Verformungen exakt detektiert werden können. Diese Funktionalität ist für Untersuchungen an EMK-

Wägesystemen essentiell notwendig, um beispielsweise die Kennlinie des optischen Nulllageindikators des Wägesystems zu verifizieren.



Abbildung 63: Links: Messkopf des Vibrometers über einer EMK-Waage; Rechts: Agilent Datenlogger, Agilent Präzisionsmultimeter, Universal Source und Vibrometer-Elektronik

Vakuumklimaprüfkammer

Im Rahmen eines Aufstockungsantrages wurde unter anderem eine Vakuumklimaprüfkammer beschafft. Der Markt derartiger Geräte ist stark begrenzt. Die Auswahl fiel nach einer europaweiten Ausschreibung auf das Produkt WK 1000 S der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH. Mit Hilfe dieser Vakuumprüfkammer können Klimauntersuchungen an Präzisionsmessgeräten durchgeführt werden. Der entscheidende Vorteil besteht hierbei in der Möglichkeit der exakten Trennung der Auswirkungen der korrelierten Klimagrößen Temperatur, Feuchte und Luftdruck.



Abbildung 64: Vakuumklimaprüfkammer

Thermografiesystem

Zur berührungslosen hochauflösenden Erfassung von Temperaturfeldern sowie Änderungen von Temperaturfeldern wurde eine hochsensitive Thermographiekamera beschafft. Auch in diesem Marktsegment sind nicht viele Hersteller aktiv. Nach einer deutschlandweiten Ausschreibung wurde die Kamera SC6000 der Firma Flir gekauft.

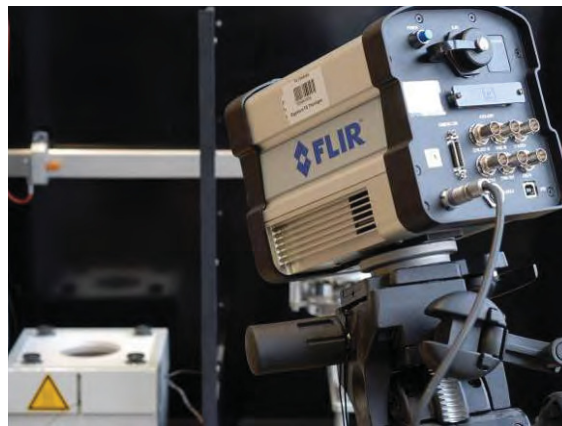


Abbildung 65: Thermokamera Flir SC 6000

Schwingungserregungssystem

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens geregelter und unregelter EMK-Systeme wurde ein Schwingungsmessplatz konzipiert und gekauft. Basierend auf einer deutschlandweiten Ausschreibung wurde das System der Firma Data Physics GmbH beschafft.

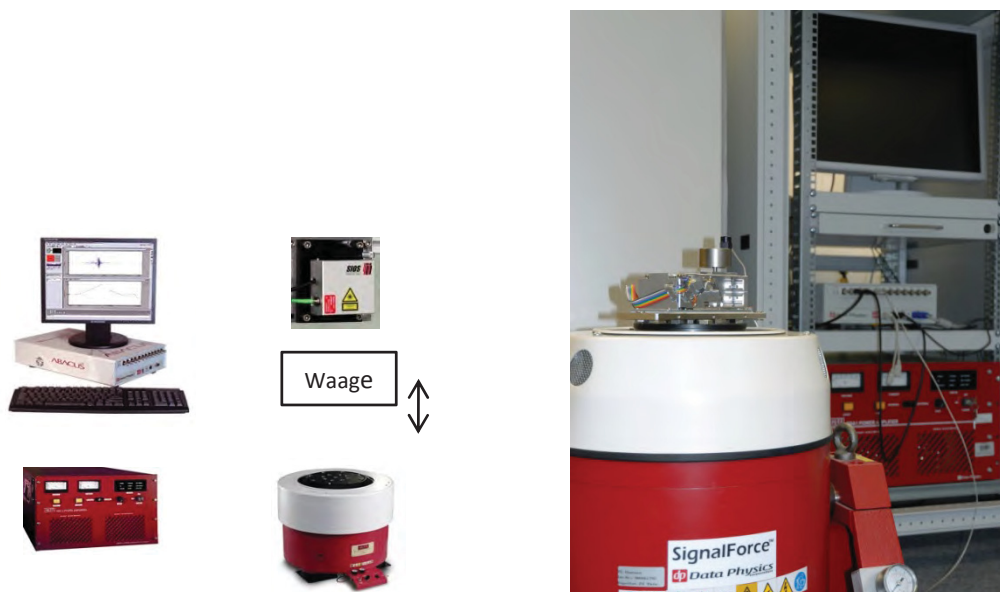


Abbildung 66: Schwingungsmessplatz der Firma Data Physics

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der in Tabelle 1 dargestellte bewilligte Arbeitsplan besteht aus 12 wissenschaftlichen Arbeitspaketen. Diese wurden von 5 Nachwuchswissenschaftlern über einen Zeitraum von 5 Jahren erfolgreich bearbeitet. Die Anforderungen zur Bewältigung der einzelnen Teilaufgaben waren hierbei sehr hoch gestellt, so dass die beantragten materiellen und finanziellen Ressourcen zur Bearbeitung und Lösung der Teilprojekte notwendig und angemessen waren. Zusätzlich wurden zahlreicher Aufgabenteilbereiche im Rahmen studentischer Arbeiten untersucht. Neben der Bearbeitung der wissenschaftlichen Aufgaben wurden im Rahmen des Projektes umfangreiche strukturbildende Maßnahmen verlangt. Für diese wurden in der Projektplanung jedoch keine Ressourcen bedacht, so dass die Bearbeitung einen nicht unerheblichen zusätzlichen Aufwand darstellte. Ebenso wurden die Nachwuchsgruppenmitglieder zusätzlich in die Lehrtätigkeit des Fachbereichs und in das Weiterbildungsprogramm des Graduiertenkolleg Lorentzkraft integriert.

4. Voraussichtlicher Nutzen

Im abgelaufenen Projekt wurden die Kompetenzen und das Grundlagenwissen auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik im mitteldeutschen Raum ausgebaut.

Allem voran steht hier die Qualifizierung der Nachwuchswissenschaftler und Studenten zu, wodurch dringend benötigter Nachwuchs für die Unternehmen der Region ausgebildet wurde. Hier sind zum Beispiel die Promotion und der Wechsel zur SIOS Meßtechnik GmbH von Frau Dr. Svitlana Dontsova zu nennen. Herr Dr. Falko Hilbrunner und Dipl. Ing. Mario Schreiber sind nach Abschluss des Projektes von der Sartorius Weighing Technology GmbH übernommen worden. Die Firma PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG / PAARI Systemhaus GmbH, Erfurt stellte während der Projektlaufzeit den Absolventen Nico Schröder als Abteilungsleiter der Entwicklung ein. Als zusätzliche Qualifizierung wird Herr Schröder im IPMS Promovieren. Darüber hinaus wurde auch der Grundstein für den eigenen wissenschaftlichen Nachwuchs am Institut Prozessmess- und Sensortechnik gelegt. Frau Dipl. Ing. Hanna Weis, Herr Dipl. Ing. Gunter Krapf, Herr Dipl. Ing. Christian Diethold und Herr Dipl. Ing. Michael Kühnel sind jeweils in der Endphase ihrer Promotion und werden außerdem das geplante Anschlussprojekt InnoProfile-Transfer bearbeiten.

Durch die enge Zusammenarbeit wurden die beteiligten Firmen untereinander sehr gut vernetzt und eine vertrauensvolle und kompetente Basis für die Zukunft geschaffen. Dies lässt sich zum Beispiel auch am Interesse aller beteiligten Firmen am Folgeprojekt InnoProfile-Transfer ablesen. Weiterhin wurde durch die enge Vernetzung der schnellere und umfassendere Zugang zu internationalen Trends und Innovationen auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik verbessert.

Durch zahlreiche internationale Veröffentlichungen und durch die Einreichung von Patenten wurde zum einen das erarbeitete Wissen gesichert und zum anderen die weltweite Sichtbarkeit der Initiative und der beteiligten Firmen deutlich erhöht.

Dadurch und durch das umfassende Erarbeiten von Lösungen technologisch relevanter Problemstellungen wird die Innovations- und Konkurrenzfähigkeit der Firmen auch in Zukunft gesichert und verbessert.

Außerdem ist durch die Arbeiten der Grundstein für weitere vielversprechende Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Kraftmess- und Wägetechnik gelegt worden. Diese sollen im Rahmen eines InnoProfile- Transferprojektes durch die Entwicklung von produktnahen Lösungen konsequent weitergeführt werden. Die wichtigsten Beispiele für den technologischen und wissenschaftlichen Nutzen der aus den durchgeführten Arbeiten hervorgeht werden im Folgenden aufgeführt:

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen im Rahmen des Projekts sind komplexe Modelle zur Abbildung und Untersuchung des dynamischen Verhaltens von EMK-Waagen. Hier wurden Starrkörper- sowie FEM Modelle erarbeitet und verglichen. Auf Basis der erarbeiteten Starrkörpermodelle können EMK-Wägesysteme schnell und umfassend modelliert und untersucht werden. Dem Anwender solcher Starrkörpermodelle wird somit eine deutliche Optimierung der Entwicklungsarbeiten von EMK-Waagen ermöglicht. Dies führt zu verkürzten Entwicklungszeiten sowie besseren Ergebnissen und damit zu einer Senkung von Kosten und einer Optimierung der Produkteigenschaften. Der Anwender der erarbeiteten Modelle besitzt somit vielfältige Vorteile gegenüber Mitbewerbern.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis sind die gewonnenen Erkenntnisse zur digitalen Regelung von EMK-Systemen. Die technische Machbarkeit einer solchen Regelung und der Implementierung verschiedener Regelstrategien wurde nachgewiesen. Mit den derzeit zur Verfügung stehenden technologischen Voraussetzungen konnten allerdings nur entweder eine hohe Präzision oder eine große Geschwindigkeit der Regelung und Messungen erreicht werden. Im Rahmen des geplanten Anschlussprojektes InnoProfile-Transfer soll auf diese Erkenntnisse und Erfahrungen aufgebaut werden und auf Basis von digitalen Signalprozessoren eine Hard- und Software zur digitalen Regelung von hochdynamischen und hochgenauen EMK-Systemen entwickelt werden. Mit einem solchen System soll dann gleichzeitig eine hohe Präzision und Geschwindigkeit der Regelung und Messungen erreicht werden. Weiterhin soll die im abgeschlossenen Verbundprojekt nachgewiesene große Adaptivität einer solchen digitalen Hard- und Software an verschiedene und komplexe Messbedingungen ausgenutzt werden. Diese universelle Hard- und Software soll über die hochdynamischen EMK-Wägetechnik hinaus auch für weitere Mess-, Steuer- und regelungstechnische Anwendungen hinaus nutzbar sein. Damit wird es möglich im beantragten Anschlussprojekt die Grundlagen für eine universelle Hard- und Software mit hervorragenden mess- und regelungstechnischen Eigenschaften zu schaffen.

Auch abseits der Laboranwendungen wurden und werden die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten genutzt. Hier ist in erster Linie die Entwicklung einer Achslastwaage für LKW und Traktoren und einer Förderbandwaage durch den Verbundpartner PAARI Waagen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG / PAARI Systemhaus GmbH, Erfurt zu nennen. Die Entwicklungsarbeiten konnte die Firma nur durch die Beteiligung am abgeschlossenen Projekt in dem Maße umsetzen.

Die Genauigkeit von EMK-Wägesystemen ist wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Nulllageindikatoren abhängig. Die umfassenden und tiefgreifenden Untersuchungen gebräuchlicher optischen Nulllagenindikatoren, die auf Basis der hervorragenden gerätetechnischen Ausstattung am Institut durchgeführt wurden, führten zu zahlreichen Detailverbesserungen, die letztendlich zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit der EMK-Waagen beitragen. Damit wird es auf Basis der Erkenntnisse für die Projektpartner möglich, technologische Lücken zu schließen bzw. sogar einen Vorsprung gegenüber Mitbewerbern aufzubauen. Da die Leistungsfähigkeit der optischen Nulllageindikatoren unter anderem stark von den optoelektronischen Bauteilen abhängt und gerade hier eine

große Dynamik auf dem Markt besteht, kann die Konkurrenzfähigkeit in Zukunft nur durch weitere fortwährende und konsequente Arbeiten auf diesem Gebiet sichergestellt werden. Das IPMS konnte sich im Rahmen des InnoProfile-Projektes durch das erarbeitete Wissen und die optimale gerätetechnische Ausstattung als kompetenter Ansprechpartner auf diesem Gebiet etablieren. Zur weiteren Verwertung der erarbeiteten Ergebnisse ist das IPMS daher im Rahmen des Forschungsrahmenvertrages mit der Sartorius Weighing Technology GmbH am AMOS-Projekt „Lageindikator“ beteiligt (<http://www.amos-solution.de/applikationen/projekte/lageindikator>). Hier werden in Zusammenarbeit mit dem CIS Erfurt verbesserte optische Lageindikatoren entwickelt. Darüber hinaus wurde im Laufe des abgeschlossenen InnoProfile- Projekts mit dem Prinzip einer kapazitiven Differenzialanordnung ein vielversprechender Ansatz für eine technologische Alternative zu optischen Nulllageindiktoren gefunden. Dieser Ansatz soll im Rahmen des geplanten InnoProfile- Transfer Projektes untersucht, weiterentwickelt und damit verwertet werden. Aus technologischer Sicht ergeben sich wichtige Vorteile gegenüber optischen Lageindikatoren. Zum Beispiel wird die Verlustleistung dieses Sensors und damit die Wärmeentwicklung deutlich geringer sein. Außerdem besteht mit einer Ein-Chip-Lösung die einfache und direkte Möglichkeit einer A/D Wandung des Signals, was ein Potential für Kostenreduzierung hervorbringt.

Außerdem ist der entwickelte elektrodynamische Lastwechsler (bestehend aus eine Spule-Magnet Paarung) für die weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen an hochdynamischen Waagen von immensen Nutzen. Mit Hilfe dieses Lastwechslers werden auch in Zukunft Untersuchungen von Amplituden- und Phasenfrequenzgängen von realen Waagen durchgeführt werden.

Aus den Untersuchungen zu den Windlasten an Silowaagen ging die Erkenntnis hervor, dass der auf Gebäude wirkende Wind auch hochgenaue Labormessungen beeinflussen kann. Kleinste Verkippungen des Gebäudes und damit der hochgenauen Waagen Verfälschen das Messergebnis. Für Weiterführende Untersuchungen hierzu werden hochauflösende Absolutinklinometer benötigt, welche in Folgeprojekten entwickelt werden sollen.

Durch die vielfältigen Untersuchungen auf Basis von monolithischen EMK-Wägezellen entstand während der Projektlaufzeit die Idee, die Wägezellen auch für andere Anwendungen einzusetzen. Im geplanten InnoProfile-Transfer Projekt soll auf Basis dieser monolithischen Systeme die Grundlagen für ein Kraft-Weg- Messsystem sowie wie ein hochgenaues Inklinometer zur Neigungsmessung geschaffen werden.

Auf Basis der im Vorhaben gewonnenen Erfahrungen wurde in Zusammenarbeit mit dem Graduiertenkolleg „Lorentzkraft“ ein sechs- Achs Kraft- und Drehmomentsensor für die dynamische Messungen von Lorentzkräften in strömenden Medien entwickelt [22] und zum Patent angemeldet.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

International forschen und entwickeln neben den Staatsinstituten eine Vielzahl an Einrichtungen und Unternehmen an Konzepten und Messsystemen im Bereich der Kraftmess- sowie Wägetechnik. Bedingt durch die hochspeziellen Problemstellungen, welche im Rahmen des InnoProfile-Projektes zusammen mit den beteiligten Unternehmen bearbeitet wurden, kann zum Teil nur ein bedingter Bezug zum Fortschritt der internationalen Entwicklung hergestellt werden. Aus diesem Grund sei im Folgenden vor allem auf Trends verwiesen, welche während der Projektbearbeitung beobachtet wurden:

Die Forschung und Entwicklung im Bereich der hochpräzisen EMK-Wägesysteme der vergangenen Jahre verdeutlicht, dass mit den immensen Fortschritten in der Halbleiterindustrie der Einsatz von digitaler Hardware auch in der Kraftmess- und Wägetechnik in zunehmendem Maße an Bedeutung gewonnen hat. Dies bezieht sich nicht nur auf die reine Aufbereitung und Auswertung von Messwerten, sondern umfasst vor allem die digitalen Filter- und Regelkonzepte. Das industrielle und wirtschaftliche Interesse in diesem Bereich wird vor allem durch die aktuelle Patentlage wiedergespiegelt. So werden beispielsweise in [23] Konzepte für synthetische Regler von EMK-Systemen vorgeschlagen. Aber auch für die direkte Kompensation systematischer Störeinflüsse bestehen zunehmend digitale Lösungen sowie Regelkonzepte [24]. Dieser Trend zeigt deutlich, dass die im Rahmen der InnoProfile-Initiative geschaffenen Voraussetzungen einen wesentlichen Beitrag zur Erweiterung des internationalen Wissensstandes ermöglichen.

Der derzeitige Forschungsstand auf dem Gebiet der dynamischen EMK-Wägetechnik bzw. der Modellierung und Messung schwingender Wägesysteme sowie Waagenbauteile wird unter anderem durch Untersuchungen an der Tokioter Universität repräsentiert [25]. Hierin wird deutlich, dass verbleibende Abweichungen zwischen bisherigen Modellansätzen und praktischen Messungen auch weiterhin erhebliches Potential für künftige Untersuchungen liefern.

Abgesehen von den Forschungsarbeiten im Rahmen der InnoProfile-Initiative, konnten während der Projektlaufzeit keine internationalen Entwicklungstrends hinsichtlich einer signifikanten Verbesserung der Nulllageindikatoren von EMK-Wägesystemen verzeichnet werden. Allerdings wurden in letzter Zeit unter anderem an der TU Delft erhebliche Fortschritte bei hochauflösenden optischen Absolutlängenmesssystemen erzielt [26], welche eine denkbare Alternative zu herkömmlichen Nulllageindikatoren darstellen.

Dieses scheinbar geringe wissenschaftliche Interesse betrifft jedoch nicht die Trends im Bereich der Straßenfahrzeugwaagen. Im Rahmen der internationalen metrologischen Harmonisierung wurde 2006 die Richtlinie OIML R 134-1 [27] von der Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML) veröffentlicht. Sie dient als Referenz bezüglich des internationalen Wissensstandes zur Eichung von Straßenfahrzeugwaagen und kann an die im Rahmen des Projektes untersuchten Plattformwaagen adaptiert werden.

Trotz einer Vielzahl innovativer Ansätze und Verfahren zur Integration von Wägesystemen in Silos (siehe z.B. [28]), scheint die Berücksichtigung des Einflusses von Windlasten nur bedingt im Fokus der aktuellen Forschung und Entwicklung zu stehen. Gleiches gilt für den Bereich der Fahrzeugwaagen, in dem sich Innovationen scheinbar vor allem auf konstruktive Details [29] sowie mobile Systeme [30] beschränken.

Vor allem im Bereich abseits der herkömmlichen Kraftmessverfahren über Dehnmessstreifen oder elektromagnetische Kompensationsverfahren konnte innerhalb der letzten Jahre ein erheblicher Zuwachs an wissenschaftlichem Interesse beobachtet werden. So wurde zum Beispiel das Konzept der Quarzmikrowaage auf aktuelle Fragestellungen der Biosensorik bzw. Pharmazie ausgeweitet [31]. Aber beispielsweise auch die Bestimmung allgemeiner Stoffeigenschaften, wie Dichte und Viskosität, erscheint mit diesen alternativen Wägeverfahren als zukunftssträftig [32]. Diese Ansätze zeigen das Potential der Grundlagenuntersuchungen, welche im Rahmen des InnoProfile-Projektes durchgeführt wurden.

Abschließend kann man sagen, dass während der Projektlaufzeit keinerlei Publikationen bekannt wurden, die die Ansätze, Lösungswege und Ergebnisse der IKWI-Initiative in Frage stellen.

6. Veröffentlichungen

Veröffentlichungen:

- SIMULATION OF THERMAL BEHAVIOR IN HIGH-PRECISION MEASUREMENT INSTRUMENTS
H. Weis, S. Augustin; In: International Journal of Thermophysics. New York, NY : Springer Science + Business Media B.V., ISSN 15729567 (2008), 3, S. 1184-1192
- NOVEL HIGH-RESOLUTION INTERFEROMETRIC MATERIALS TESTING DEVICE FOR THE DETERMINATION OF THE VISCOELASTIC BEHAVIOUR OF HIGH-TECH PLASTICS
M. Kühnel, F. Hilbrunner, G. Jäger, XIX IMEKO World Congress, September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal
- ERMITTLUNG DES EINFLUSSES VON VERUNREINIGUNGEN AUF DAS THERMOMETRISCHE FIXPUNKTMATERIAL ZINK
G. Krapf, S. Augustin S, H. Mammen, G. Blumröder; Tagungsband Fachtagung "Temperatur 2009", Berlin; Braunschweig, Berlin : Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2009
- VERGLEICH VON ARITHMETISCHEN METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER FIXPUNKTTEMPERATUR AUS TEMPERATURVERLÄUFEN
M. Schalles, G. Krapf; Tagungsband Fachtagung "Temperatur 2009" Berlin, Braunschweig, Berlin : Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2009
- COMPARISON OF DIFFERENT METHODS OF FIXED-POINT TEMPERATURE EVALUATION
G. Krapf, M. Schalles; IMEKO XIX World Congress "Fundamental and Applied Metrology", Lisbon, Portugal
- ESTIMATION OF FIXED-POINT TEMPERATURES – A PRACTICAL APPROACH
G. Krapf, M. Schalles, T. Fröhlich; Measurement - Journal of the International Measurement Confederation 44 (2011), Nr. 2. Amsterdam : Elsevier Ltd., 2010, ISSN 0263-2241, S. 385-390
- COMPARISON OF DIFFERENT LOAD CHANGERS FOR EMFC-BALANCES
F. Hilbrunner, H. Weis, T. Fröhlich, G. Jager, IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 22-25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand
- HIGH PRECISSION OPTICAL POSITION SENSOR FOR ELECTROMAGNETIC FORCE COMPENSATED BALANCES
C. Diethold, T. Fröhlich, F. Hilbrunner, G. Jäger, IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 22-25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand
- PARAMETRIC MECHATRONIC MODEL OF A LOAD CELL WITH ELECTROMAGNETIC FORCE COMPENSATION
H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, G. Jäger, IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 22-25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand
- CLIMATE CHAMBER FOR A HIGH TEMPERATURE STABILITY
M. Kühnel, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, K. Lieberherr, SENSOR 2011 B8, 15th International Conference on Sensors and Measurement Technology

- LONG TERM STABILITY OF MINIATURE FIXED-POINT CELLS USED IN SELF-CALIBRATING THERMOMETERS
G. Krapf, T. Fröhlich, S. Augustin, H. Mammen, G. Blumröder, M. Schalles, F. Hilbrunner; SENSOR 2011, 15th International Conference on Sensors and Measurement Technology
- NOVEL CONCEPT OF A HIGH PRECISION 6-DOF FORCE/TORQUE TRANSDUCER
Ilko Rahneberg, Falko Hilbrunner, Thomas Fröhlich; NCSLI 2011, Washington DC, (21.08.11.-25.08.11)
- TRACEABLE DETERMINATION OF RELEVANT MATERIAL PARAMETERS FOR THE MASS AND FORCE METROLOGY
M. Kühnel, F. Hilbrunner, G. Jäger, T. Fröhlich; NCSLI 2011, Washington DC, (21.08.11.-25.08.11)
- PRÄZISE UND KOSTENGÜNSTIGE LAGEBESTIMMUNG MITTELS KAPAZITIVER SENSORIK
M. Pufke, F. Hilbrunner, C. Diethold, Prof. T. Fröhlich; IWK Conference 2011; TU Ilmenau
- MECHATRONIC FEM-MODEL OF A ELECTROMAGNETIC FORCE COMPENSATED LOAD CELL
H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, G. Jäger; IWK Conference 2011; TU Ilmenau
- FORCE MEASUREMENT OF LOW FORCES WITH HIGH DEAD LOADS
C. Diethold, F. Hilbrunner, T. Fröhlich; IWK Conference 2011; TU Ilmenau
- IMPURITY DEPENDENCE OF INDUSTRIAL SUITED THERMOMETRIC METAL FIXED-POINTS
G. Krapf, H. Mammen, G. Blumröder, T. Fröhlich; IWK Conference 2011; TU Ilmenau



Betreute studentische und wissenschaftliche Arbeiten

Abgabetermin	Student	Thema	Art der Arbeit
08/2006	H. Höfer	Untersuchung der Temperaturverteilung im Prototypkomparator	Praktikum
04/2007	K. Illert	Programmierung und Erprobung eines „hardware in the loop“ Systems zur digitalen Regelung von EMK-Waagen mittels des Programmiersystems LabView	Diplomarbeit
05/2007	B. Liebisch	Praktikumsversuch Wägetechnik	Projektarbeit
07/2007	M. Neuland	Beitrag zur Massebestimmung von Silos	Diplomarbeit
07/2007	D. Kovalchuk	Bestimmung der Werkstoffeigenschaften ausgewählter Kunststoffproben	Diplomarbeit
11/2007	M. Stiebritz	Messaufbau „Dynamische Wägetechnik“	Diplomarbeit
11/2007	K. Illert	Überführung einer digitalen Waagenregelung von LabView zu LabView Realtime	Wiss. Hilfskraft
03/2008	M. Schreiber	Untersuchungen zu den Anfahr- und Belastungsvorgängen am 1kg Massekomparator	Projektarbeit
03/2008	D. Hißbach	Programmierung und Ansteuerung eines Wägeroboters	Projektarbeit
05/2008	V. Obertailo	Steuerungsoptimierung eines Vibrationserregers als Bestandteil eines Vibrationsmessgerätes	Gaststudentin
08/2008	N. Schröder	Konzeption und Aufbau eines Achslastwägesystems mit integrierter Fahrzeugzuordnung	Diplomarbeit
10/2008	H. Nguyen	Theoretische Untersuchungen zu digitalen Reglern für eine EMK-Waage	Studienarbeit
02/2009	Sen Wu	Konzeption und Erprobung optimaler Programmarchitekturen in CVI für Realtime-Applikationen	Gaststudent, China
02/2009	Ma Long	Programmierung eines Multiclient / Server basierten Interfaces für Messgeräte	Gaststudent, China
07/2008	A. Ignatov	Entwicklung einer Präzisionsstromquelle	Diplomarbeit
10/2008	D. Hißbach	Firmware und Steuerungselektronik für Portalrobotersystem	Stud. Hilfskraft
02/2009	M. Schreiber	Hochgenaue Massebestimmung - Analyse und Optimierung	Diplomarbeit
06/2008	S. Dontsova	Digitale Signalverarbeitung in der dynamischen Wägetechnik	Promotion



Abgabetermin	Student	Thema	Art der Arbeit
09/2008	C. Hohbein	Kapazitiver Kraftsensor	Diplomarbeit
07/2009	V. Gorbatiy	Entwicklung einer Klimasimulationsbox	Diplomarbeit
07/2009	C. Hesse	Erstellen einer Bedienungsanleitung und Softwareuntersuchungen am CCR Roboter	Studienarbeit
09/2009	M. Weinrich	Konzeption und Aufbau eines pneumatisch betriebenen Miniaturlastwechslers für die Präzisionswägetechnik	Projektarbeit
09/2009	M. Rudolph	Konzeption und Aufbau eines Förderbandwägesystemes	Diplomarbeit
09/2009	B. Mußbach	Entwicklung eines Prüfverfahrens für Oberschenkel-Schäfte	Bachelorarbeit
10/2009	G. Pausch	Konstruktion von Anpassungstools für eine Messanlage zur Prüfung messtechnischer Eigenschaften von Checkweighern	Studienarbeit
10/2009	S. Mäuselein	Untersuchungen an gesputterten Silizium-Verformungskörpern für die Anwendung in der Präzisionskraftmess- und Wägetechnik	Promotion
12/2009	M. Gu	Untersuchung des Einflusses von Krafteinleitungssystemen auf die Messunsicherheit bei der Messung kleiner Kräfte	Diplomarbeit
01/2010	H. L. Nguyen	Optimierung verschiedener digitaler Reglerkonzepte für dynamische EMK-Waagen	Diplomarbeit
01/2010	C. Hesse	Web-basierte Remote-Services für Gewichtswägeroboter	Diplomarbeit
01/2010	R. Laß	Konzeption und Implementierung einer Web-Anwendung zur Steuerung eines Wägeroboters	Diplomarbeit
03/2010	Ch. Sternkopf	Hochgenaue Massebestimmung – Massestückzentriereinheiten	Projektseminar
04/2010	B. Balsam	Hochgenaue Massebestimmung – Konzept zur Lastwechslerjustage	Projektseminar
04/2010	D. Nasada	Industriepraktikum Sartorius AG	Praktikum
08/2010	D. Nasada	Untersuchungen von Temperatureffekten bei elektromagnetischen Waagen in Bezug auf Kaltstart und Temperaturwechseln	Bachelorarbeit
04/2011	M. Weyh	Entwicklung es kapazitiven Lagesensors	Projektarbeit



Abgabetermin	Student	Thema	Art der Arbeit
12/2010	A. Handrich	Hochgenaue Massebestimmung – Temperaturabhängigkeit und Kraftabhängigkeit der Eigenfrequenzen von Quarzsensoren.	Projektseminar
06/2010	X. Xin	Gegenüberstellung unterschiedlicher Varianten von Gravimetern in Hinblick auf Messunsicherheit und Auflösung	Projektarbeit
12/2010	X. Xin	Theoretische Untersuchungen zur Optimierung der Belastungszyklen bei der Kalibrierung von Plattformwaagen	Diplomarbeit
12/2010	A. Ribeiro	Untersuchungen zur Neigungsempfindlichkeit von Fundamenten	Projektarbeit
05/2010	M. Pufke	Entwicklung der Messelektronik für einen kapazitiven Lagesensor	Diplomarbeit
02/2011	B. Balsam	Theoretische Betrachtungen und experimentelle Untersuchungen zur hochgenauen Neigungsmessung	Masterarbeit
12/2010	N. Rogge	Sartorius: Untersuchungen zum Kriechverhalten	Praktikum
03/2011	R. Petzold	Analogieuntersuchungen an elektrodynamischen Lautsprechern und Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation	Masterarbeit
04/2011	N. Rogge	Untersuchungen zum Kriechverhalten	Bachelorarbeit
04/2011	A. Handrich	Digitale Filterung in der dynamischen Wägetechnik	Masterarbeit

Tabelle 6: Studentische und wissenschaftliche Arbeiten

Öffentliche Vorstellung des IP Projektes:

Präsentationen und Vorträge:

- Vortrag zur Vorstellung des IP Projektes zur Eröffnungsveranstaltung des Graduiertenkollegs „Lorentzkraft“, 2010
- Vortrag zu technischen Inhalten des IP Projektes zur 1 Jahr-Feier des Graduiertenkollegs „Lorentzkraft“, 2011
- Vortrag als „Best Practice“ im Rahmen der Evaluierung in Berlin, 2009
- Vorstellung des Projektes durch Posterpräsentation im Rahmen der Verleihung des Thüringer Forschungspreises in Jena
- Informationsstand zum InnoProfile Projekt zum Tag der offenen Tür an der TU-Ilmenau, 2007
- Informationsstand zum InnoProfile Projekt zum Tag der offenen Tür an der TU-Ilmenau, 2008
- Informationsstand zum InnoProfile Projekt zum Tag der offenen Tür an der TU-Ilmenau, 2009
- Informationsstand zum InnoProfile Projekt zum Tag der offenen Tür an der TU-Ilmenau, 2010
- Vorstellung des Projektes in Zeitschrift Unternehmen Region, 2006
- Pressemitteilung: Innovative Kraftmess- und Wägetechnik für Thüringer Wirtschaft, 2006

Fachkonferenzen / Kongresse:

- IWK Conference / ICPM 2008, Ilmenau
- IWK Conference, 2011, Ilmenau
- IMEKO Conference Tempmeko, Kanada, 2007
- IMEKO World Congress, Lissabon, 2009
- IMEKO Conference, Thailand, 2010
- Fachtagung Temperatur, Berlin, 2009
- Conference Sensor & Test 2010
- Conference Sensor & Test 2011

Workshops mit Teilnahme:

- Ansys User Meeting, 2008
- Workshop: FEM Berechnung von Kunststoffen, 2008
- Workshop: Gründungsmanagement, 2009
- Workshop: Strategie, Taktik, Verständigung, 2009
- Summer school, Graduiertenkolleg, Berlin, 2010

- Closed Session Graduiertenkolleg, Heyda, 2010
- Closed Session Graduiertenkolleg, Österreich, 2011

Messen:

- Sensor & Test 2010
- Sensor & Test 2011
- Messtechnik München, Meilhaus, 2008

Auslandsaufenthalte / Auslandsreisen:

H. Weis	IMEKO Kanada, 2007
	IMEKO Thailand, 2010
F. Hilbrunner	BIPM Paris, 2007
	LNE Paris, 2007
	IMEKO Thailand, 2010
C. Diethold	IMEKO Thailand, 2010 (war zum Zeitpunkt schon im Graduiertenkolleg)
M. Kühnel	Sartorius TCC USA, 2010
M. Schreiber	LNE Paris, 2010
	BIPM Paris, 2010
	NIM China, 2010
	NIM Norwegen, 2010

Literaturverzeichnis

- [1] H.-L. Nguyen, Optimierung verschiedener digitaler Reglerkonzepte für dynamische EMK-Waagen, Diplomarbeit, Ilmenau, 2010.
- [2] S. Dontsova, Digitale Signalverarbeitung für die dynamische Wägetechnik, Dissertation, Ilmenau, 2008.
- [3] J. Paros und L. Weisbord, „How to design flexure hinges,“ in *Machine Design*, 1965, pp. 151-156.
- [4] H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich und G. Jäger, „Parametric mechatronic model of a load cell with electromagnetic force compensation,“ in *Proceedings IMEKO TC3*, Thailand, 2010.
- [5] H. Weis, F. Hilbrunner, T. Fröhlich und G. Jäger, „Mechatronic FEM-Model of an electromagnetic force compensated load cell,“ in *Internationales wissenschaftliches Kolloquium*, Ilmenau, 2011.
- [6] C. Diethold, T. Fröhlich, F. Hilbrunner und G. Jäger, „High precision optical position sensor for electromagnetic force compensated balances,“ in *Proceedings IMEKO TC3*, Thailand, 2010.
- [7] M. Kim und et.al., „Atomic force microscope probe calibration by use of a commercial precision balance,“ in *Measurement 40*, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Science Town, Daejeon, P.O. Box 102, Republic of Korea, 2007, pp. 756-760.
- [8] F. Hilbrunner, Ein Beitrag zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten, Dissertation, Ilmenau, 2005.
- [9] X. Xin, Theoretische Untersuchungen zur Optimierung der Belastungszyklen bei der Kalibrierung von Fahrzeugwaagen, Diplom, TU Ilmenau, 2010.
- [10] F. Hilbrunner, H. Weis, T. Fröhlich und G. Jäger, „Comparison of different load changers for EMFC-balance,“ in *Proceedings IMEKO TC3*, Thailand, 2010.
- [11] Sartorius GmbH, Gebrauchsmuster G8805155.2, „Oberschalige Waage mit selbstzentrierender Waagschale“. Deutschland 19 04 1988.
- [12] Sartorius GmbH, Gebrauchsmuster G8317130.4, „Oberschalige Waage mit selbstzentrierender Waagschale“. Deutschland 11 06 1983.
- [13] C. Sternkopf, Untersuchung von Massestückzentriereirichtungen, Projektseminararbeit, Ilmenau, 2010.
- [14] M. Neuland, Beitrag zur Massebestimmung von Silos, Diplomarbeit, Ilmenau, 2007.

- [15] M. Kühnel, F. Hilbrunner, T. Fröhlich und K. Lieberherr, „Climate chamber for a high temperature stability,“ in *15th International Conference on Sensors and Measurement Technology*, Nürnberg, 2011.
- [16] M. Kühnel, F. Hilbrunner, G. Jäger und T. Fröhlich, „Traceable determination of relevant material parameters for the mass and force metrology,“ in *Proceedings NCSLI*, Washington DC, 2011.
- [17] H. E. Lockery und R. L. Gray, „Double Bending Beam Load Cell“. USA Patent US 6504114 B1, 07 01 2003.
- [18] B. Balsam, Theoretische Betrachtungen und experimentelle Untersuchungen zur hochgenauen, Masterarbeit, Ilmenau, 2011.
- [19] I. Rahneberg, F. Hilbrunner und T. Fröhlich, „Novel concept of a high precision 6-DOF force/torque transducer,“ in *Proceedings NCSLI*, Washington DC, 2011.
- [20] Shimadzu Corp., Japan, „Electric balance with synthetic PID control signal“. USA Patent US 7 227 089 B2, 05 06 2007.
- [21] Mettler Toledo AG, Schweiz, „Gesteuerte und/oder geregelte Kraftmessvorrichtung“. Europa Patent EP 2 253 944 A1, 24 11 2010.
- [22] Y. Yamakawa und T. Yamazaki, „Dynamic behavior of checkweigher with electromagnetic force compensation (2nd report,“ in *Proceedings IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22*, Thailand, 2010.
- [23] K. N. Ki-Nam Joo und et al., „High Resolution Heterodyne Interferometer Without Detectable Periodic Nonlinearity,“ *Optics Express, Optical Society of America*, Bd. 18, Nr. 2, p. 1159–1165, 2010.
- [24] International Organization of Legal Metrology, „Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads – Part 1: Metrological and technical requirements (Tests),“ in *International Recommendation OIML R 134-1*, 2006.
- [25] Digi Sens AG, „Silowaage“. Patent WO 2008/037095 A1 , 03 04 2008.
- [26] R. Wöhrl, „Fahrzeugwaage“. Deutschland Patent DE 20 2009 014 453 U1, 04 03 2010.
- [27] Flexco Ind., Kanada, „Weighing Apparatus and Method for Weighing Vehicles“. Patent WO 002010/105371 A1, 2010 09 2010.
- [28] M. Höpfner, Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Quarzmikrowaage für pharmazeutisch analytische Fragestellungen, Dissertationsschrift, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Halle (Saale), 2005.

- [29] A. Itoh und M. Ichihashi, „Separate measurement of the density and viscosity of a liquid using a quartz crystal microbalance based on admittance analysis (QCM-A),“ *Journal of Measurement Science And Technology*, IOP Publishing, 2011, Bd. 22, Nr. 1.
- [30] A. Handrich, Digitale Filterung in der dynamischen Wägetechnik, Masterarbeit, Ilmenau, 2011.
- [31] J. Brändlein und P. Eschamann, Ball and Roller Bearings - Theory, Design and Application, Third Edition, England: John Wiley & Sons Ltd, 1999, 1999.
- [32] W. Krause, „Konstruktionselemente der Feinmechanik, 1. Auflage.,“ Berlin, VEB Verlag Technik, 1989, p. 311.
- [33] J. Wernstedt, Experimentelle Prozeßanalyse, 1. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik, 1989.
- [34] Gebr. Reinfurt GmbH & CO. KG., Würzburg, „Produktkatalog Miniatur- und Kleinkugellager Seite 14,“ 2010. [Online]. Available: www.grw.de. [Zugriff am 2010].